This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

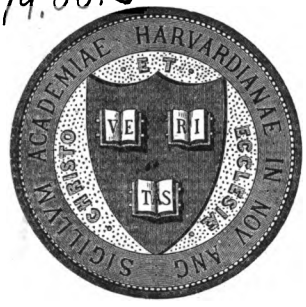
About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Eng
1779
00.3

Digitized by Google

Transferred to the
Lawrence Scientific School.
Eng 1779.00.3



Harvard College Library

FROM THE

GEORGE B. SOHIER PRIZE FUND

The surplus annual balance "shall be expended for books for the library."
— *Letter of Waldo Higginson, Jan. 10, 1893.*

Received 18 May, 1901.

TRANSFERRED
TO
HARVARD COLLEGE
LIBRARY

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

1405 6

Wirkungsgrade und Kosten

elektrischer und mechanischer

Kraft-Transmissionen.

1. **Frage:** Soll bei einer Fabrik-Neuanlage mechanische oder elektrische Transmission eingerichtet werden?
2. **Frage:** Ist es empfehlenswert, bestehende mechanische Transmissionen durch elektrische zu ersetzen?
3. **Frage:** Welches elektrische System soll angewendet werden? Gleichstrom oder Drehstrom?

Von

Ober-Ingenieur Jos. Krämer

Dozent für Elektrotechnik.

Zweite umgearbeitete und erweiterte Auflage.

Mit 82 Text-Figuren.

Leipzig

Verlag von Oskar Leiner.

1900.

Digitized by Google

Eng 1779.00.3

MAY 18 1901

LIBRARY

194.17

30 A.A

JUN 20 1917

TRANSFERRED TO

HARVARD COLLEGE LIBRARY

Das Übersetzungsrecht vorbehalten.

Digitized by Google

Vorwort zur ersten Auflage.

Die Frage der »elektrischen Transmission im Fabriksbetrieb« ist aktuell geworden.

Es werden Etablissements bis zu 1000 Einzel-Elektromotoren eingerichtet; dieselben stehen in ununterbrochenem, zufriedenstellendem Betrieb, und es zahlen derart ausgestattete Fabriken grossartige Dividenden.

Dieser technischen Neuerung volle Aufmerksamkeit zuzuwenden, ist eine unumgängliche Notwendigkeit für jeden, der sich mit maschinellen Einrichtungen beschäftigt.

Nun ist es aber nicht jedermanns Sache, die in den Folianten der Zeitschriften und in den grossen, gelehrt geschriebenen Fachwerken verstreuten Abhandlungen über dieses Thema mühsam zusammenzusuchen und dann zu studieren; gar Vielen handelt es sich auch nur darum, einen allgemeinen Überblick bezüglich des Standes dieser interessanten Frage zu gewinnen.

Zweck des vorliegenden Schriftchens ist es also, einen gedrängten Überblick über das bisher in der Frage der Kraft-Transmission Veröffentlichte zu geben; die meisten bedeutenden Arbeiten der jüngsten Zeit (ab 1890) sind dabei berücksichtigt.

Detailabhandlungen wurden vermieden. Wären die einzelnen Themata mit der für exaktere Studien nötigen Ausführlichkeit behandelt worden, so würde das wieder einen Folianten gegeben haben, der wohl gekauft, selten aber zum Nutzen des Besitzers auch studiert worden wäre.

Allen, welche sich vorläufig nur informieren wollen, dürfte dieses Werkchen willkommen sein. Zu wirklichen Ausführungen elektrischer Kraftanlagen genügt ja Bücherstudium ohnehin nicht: da muss am Objekt in einer in Betrieb stehenden Fabrik probiert und verglichen werden.

Auch als Vorbereitung zu diesen Proben können die vorliegenden Darstellungen dienen.

Berlin, im März 1895.

J. Krämer.

Digitized by Google

Vorwort zur zweiten Auflage.

Die erste Auflage dieses Buches war eine Gelegenheits-Arbeit, veranlasst durch einen öffentlichen Vortrag, den ich über die auf dem Titelblatt angegebenen Fragen in Leipzig gehalten habe. Interessierte Fachleute bestimmten mich, den Vortrag etwas weiter auszuarbeiten und im Buchhandel herauszugeben, weil die angeregten Fragen und deren Beantwortung für Besitzer, Direktoren und Betriebs-Ingenieure von Fabriken aller Art ganz besondere Bedeutung haben.

Dass in verhältnismässig kurzer Zeit eine zweite Auflage nötig wurde, durfte ich wohl als Beweis dafür ansehen, dass die Erörterungen über diese Themata wirklich vielfaches Interesse boten. Bei der Neubearbeitung wurden nun nicht nur alle Fortschritte der Neuzeit ausreichend berücksichtigt, ich habe diesmal auch umfassendere technische Ausführungen eingeschaltet, sodass das Werkchen gewiss auch weiteren Kreisen manches Interessante über das Thema bieten wird.

Um die Erzielung eines hohen Wirkungsgrades (Nutzeffektes) dreht sich heutzutage fast jede sachliche Unterhaltung derjenigen, die Kraftübertragungs- und Kraftverteilungs-Anlagen schon haben oder einrichten wollen oder konstruieren und bauen müssen. Der »Wirkungsgrad« $= \frac{\text{nutzbare Leistung}}{\text{aufgewendete Kraft}}$ ist einer der Hauptangelpunkte, um die sich unser ganzes, so hoch entwickeltes technisches Leben dreht; er ist fast so wichtig, wie der sonst alles beherrschende »Kostenpunkt«.

Den mechanischen Wirkungsgrad von Kraftanlagen durch Messen zu ermitteln, macht heutzutage fast gar keine Schwierigkeiten mehr. Befriedigt das Messresultat, dann ist die Angelegenheit zufriedenstellend erledigt. Ist aber der durch Messen bestimmte Wirkungsgrad nicht derart, dass er vollkommen zufrieden stellt, dann wird die Frage wichtig, wie man den Wirkungsgrad berechnen kann; denn kennt man die bestimmenden Faktoren, dann weiss man auch, wo die Kraftverluste zu suchen sind und wo man anfassen muss, um den zu niedrigen Wirkungsgrad im Werte zu erhöhen.

Digitized by Google

Leider zeigen die Ausführungen in diesem Buche, dass uns bezüglich des Berechnens der Wirkungsgrade noch nicht alle Wünsche erfüllt worden sind, und dass insbesondere im Gebiete der sonst so modernen Wechselstromtechnik noch viel geleistet werden muss, um zum erwünschten Ziele zu gelangen.

Es ist eine schon längst anerkannte und nicht unbegründete Thatsache, dass bei allen Entscheidungen der Techniker die Frage nach den Kosten ein — man kann aber ohne weiteres sagen »das« — Hauptmoment bildet und schliesslich den Ausschlag giebt. Nun ist es zweifellos eine schwierige und missliche Sache, in einem Buche Kostenziffern zu veröffentlichen. Im II. Teil dieses Werkes wurden trotzdem gewissenhaft gesuchte Mittelwerte eingesetzt, um ein weit umfassendes Bild der Anschaffungs- und Betriebskosten zu schaffen; sollten da nicht alle Wünsche erfüllt worden sein, so möge das mit den Schwierigkeiten entschuldigt werden, die sich jeder derartigen Arbeit entgegenstellen. Anderseits ist aber im Abteil über die Kosten eine so bedeutende Fülle von Material zusammengedrängt, dass dessen Studium gewiss vielfachen Nutzen und Bequemlichkeiten für jene schaffen kann, die sich mit der Kostenfrage für maschinen-technische Einrichtungen eingehender beschäftigen müssen.

Dresden, im November 1899.

J. Krämer.

Digitized by Google

Inhalts-Verzeichnis.

Seite

Vorwort zur ersten Auflage III
Vorwort zur zweiten Auflage IV

Einleitung.

Begriff des Wirkungsgrades. — Generator, Leitung, Motor . . 1

Die mechanische Kraftübertragung.

Die Grundgleichung. — Berechnung der Stahl- und Eisenwellen. — Das drehende und das biegende Moment. — Die Lagerung der Wellen. — Zapfenreibung. — Die durch diese verbrauchte Arbeit. — Beispiel der Berechnung . . . . . 2 — 7

Der Riemenantrieb.

Die Zugkraft. — Die Beanspruchung. — Die Riemengeschwindigkeit. — Berechnung der Leder-Treibriemen. — Das Riemengleiten . 7 — 9

Kraftverluste beim Riemenantrieb.

Der Achsendruck. — Lagerreibung. — Verlust an Geschwindigkeit. — Steifheit des Riemens. — Erhaltungskosten . . . . . 9 — 10

Der Seiltrieb.

Berechnung der Hanfseile. — Seilscheiben. — Erhaltungskosten. — Berechnung der Drahtseile. — Seilgeschwindigkeit . . . . 10 — 12

Kraftverluste beim Seiltrieb.

Zapfenreibung. — Luftwiderstand. — Gleiten des Seiles. — Steifigkeit der Seile. — Die Anlage in Oberursel . . . . . 12 — 14

Beispiele über Wirkungsgrad-Ermittelungen und Konstruktions-Ausführungen . . . . . 14 — 19

Die hydraulische Kraftübertragung.

Durchflussgeschwindigkeiten. — Druckhöhe. — Gefälle. — Arbeitshöhe. — Generator. — Wasserleitung. — Motoren. — Pumpwerk. — Freie Gerinne. — Gefällverlust. — Druckhöhenverlust. — Änderungen der Leitungsrichtung. — Arbeitsverlust. — Die Rohre 20 — 24

Die Motoren.

Die Wasserräder, — unterschlächtige, mittelschlächtige, rückenschlächtige, oberschlächtige. — Wasserturbinen, — vertikale und horizontale, — radiale und achsiale, — volle und partiale. — Aktions- und Reaktionsturbinen. — Jonval- und Girard-Turbinen. — Entlastungsvorrichtungen. — Regulatoren . . . . . 24 — 29

Berechnungsbeispiele . . . . . 29 — 35

Digitized by Google

Die pneumatische Kraftübertragung. Seite

Einleitung. — Trockene, halbnasse und nasse Kompressoren. — Verbundkompressoren. — Der Riedler-Kompressor. — Die Luftleitungen. — Kraftverluste. — Die Anlagen in Offenbach a. M. und in Paris. — Der volumetrische und der dynamische Wirkungsgrad. — Die Luftmotore. — Ventil- und Schiebermotore . . . . 36 — 44

Berechnungsbeispiele . . . . . 44 — 46

Die elektrische Kraftübertragung.

A. Gleichstrom.

Die Dynamomaschine. — Die Kraftverluste in derselben. — Die elektrotechnischen Maasseinheiten. — Die Leerlaufarbeit. — Der elektrische Wirkungsgrad. — Der mechanische Wirkungsgrad. — Kraftbedarf und Wirkungsgradberechnung bei Hauptstrom- und Nebenschluss-Dynamos. — Die Joule'schen Verluste. — Hysteresis. Wirbelströme. — Die dazu gehörigen Diagramme. — Die Selbstinduktion. — Die gegenseitige Induktion. — Kurzschluss. — Ankerreaktion. — Veränderte Tourenzahl. — Mechanische Kraftverluste. — Druck der Stromabnehmer . . . . . 47 — 57

Die Streuung. — Leistung und Wirkungsgrad von Elektromotoren. — Genaue Ermittelung der Leistungen. — Die Zugkraft. — Die Geschwindigkeit. — Die Tourenzahl. — Wirkungsgrad, Watt und P. S. — Wirkungsgrad bei verschiedener Belastung . . . . . 57 — 61

Die Leitungen.

Berechnung derselben 62

Gesamtanordnung.

Hauptstromschaltung. — Änderung der Tourenzahlen. — Parallelschalten der Motore. — Anlass- und Umkehranlass-Widerstände. Die verschiedenen Schaltungen. — Der Wirkungsgrad ganzer Anlagen. — Verwendung der verschiedenen Schaltungen. — Der Rückgewinn grösser als die Leistung. — Beispiel dazu . . . . 63 — 68

B. Wechselstrom und Drehstrom.

Wechselstromdynamos. — Stromkurven. — Wechselstrommotore für einphasigen Wechselstrom. — Drehstrommotor der A. E.-G. — Drehstrommotor von Siemens & Halske. — Schaltung von Drehstromanlagen. — Drehstromleitungen. — Berechnung derselben. — Die elektrostatische Kapazität. — Dreieck- und Sternschaltung. — Vorzüge des Drehstroms . . . . . 69 — 78

Welches Stromsystem soll bei elektrischen Kraftübertragungen gewählt werden? . . . . . 78 — 79

Gruppenantrieb — Einzelantrieb . . . . . 79 — 81

Soll bei einer Fabriks-Neuanlage mechanische oder elektrische Transmission eingerichtet werden?

Ist es empfehlenswert, bestehende mechanische Transmissionen durch elektrische zu ersetzen?

Vergleichung des Wirkungsgrades mechanischer und elektrischer Übertragung. — Stillstände der Maschine. — Beste Tourenzahl. Das Messen der Arbeit . . . . . 81 — 84

Digitized by Google

Weitere theoretische Betrachtungen über den Wirkungsgrad bei Wechselstromanlagen. Seite

Einleitung. — Die verschiedenen Arten von Wechselstromdynamos. — Die Selbstinduktion. — Die Magnetisierung durch den Ankerstrom. — Die Phasenverschiebung zwischen E und J. — Negative Watt. — Scheinbare und wirkliche Watt. — Phasometer (Leerstrommesser). — Wattloser Strom. — Beispiel . . . . . 84 — 92

Wechselstrommotore. — Wirkungsgrad derselben. — Wirkungsgrad vom Kohlenäquivalent bis zur Schalttafel . . . . . 92 — 96

Ansehaffungs- und Betriebskosten.

Anschaffungskosten für mechanische Transmission 97
» » » Drahtseiltrieb 97
» » » Wassertrieb 98
» » » Lufttrieb 98
» » » elektrische Transmission 98
Approximative Kosten für Dampfkessel und Dampfmaschinen . . 100
» » » Dampfmaschinen 100
» » » Lokomobilen 100
» » » Gasmotoren 100
» » » Dynamomaschinen 101
» » » Elektromotoren 101
» » » Akkumulatoren 101
Ausführlichere Liste über Kosten von Dynamos und Motoren . . 102
» » » » » grossen Dynamos 103
» » » » » Dampfdynamos 103
» » » » » kleinen Gleichstrommotoren 103
Betriebskosten 103

Berechnungsbeispiele.

Übertragung von 50 P. S. auf 10 *km* mit Gleichstrom 104
» » 160 P. S. » 70 *km* » Gleichstrom (mit Kostenanschlag) 106
Betriebskosten-Berechnung zu einer elektrischen Beleuchtungsanlage 109
Einrichtung einer Fabrik mit 20 Gleichstrom-Elektromotoren . . 109
Betriebskosten bei I mit Dampfmaschinen-Anlage 110
» » II » Gasmotoren- » 110
» » III » Dawson-Gas- » 111
Kostenanschlag zu einer elektrischen Bohranlage 111
» » » Kraftübertragung mit Drehstrom . . . 113
a) 3000 Volt 113
b) 4000 Volt 115
Betriebskosten- und Rentabilitäts-Berechnung für städtische Elektrizitäts-Werke 118
I. Fall 118
II. Fall 121

Tabellen.

Drehstrom-Motoren der A. E.-G., Berlin 124
» » von A.-G. Siemens & Halske, Berlin . . . 125
Wechselstrom-Dynamos für Ein- und Mehrphasenstrom der A.-G. E. (vorm. O. L. Kummer & Co.) 125
Wechselstrom-Motoren für Ein- und Mehrphasenstrom der A.-G. E. (vorm. O. L. Kummer & Co.) 126

Digitized by Google

Bei jeder Kraftübertragung unterscheiden wir drei Teile:

1. Den Generator, d. i. jener Teil, welcher irgend eine Primärkraft, also ein Wassergefälle, Ebbe und Flut, Wind, natürliche Gasquellen, sodann Wasserdampf, künstlich erzeugtes Gas, erwärmte Luft, Naphtha, raffiniertes Petroleum, Gasolin, Benzin u. s. w. derart vorbereitet, dass dieselbe in eine fortleitungsfähige Form gebracht wird.

2. Die »Leitung«. Die Leitung überträgt die im Generator vorbereitete Energie nach jener Stelle, wo letztere ausgenutzt werden soll. Wir verwenden zu diesem Zweck Dampfröhren, Riemen und Seile, festes Gestänge, Drahtseile, Wasserröhren, Röhren mit gepresster oder evakuierter Luft und Drähte für Elektricität.

3. Die »Motore«, d. s. jene Apparate und Maschinen, welche die fortgeleitete Energie an den Endpunkten der Leitung in eine ausnutzbare Form umsetzen; wir unterscheiden: Dampfmaschinen, direkt mechanisch wirkende Maschinen (Werkmaschinen), sodann Wassermotoren, Luftmotoren und Elektromotoren.

Die Vollkommenheit der Generatoren, Leitungen und Motoren wird je nach der Höhe des Wirkungsgrades bezw. des Nutzeffektes beurteilt und daher geht auch das Bestreben aller Konstrukteure vor allem dahin, Effekte zu ermöglichen, welche die höchsten Wirkungsgrade gewähren.[1])

---

[1]) Anmerkung: Der Wirkungsgrad wird gewöhnlich mit dem griechischen Buchstaben η bezeichnet, und es ist

$$\eta = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Gesamtarbeit}}; \text{ oder}$$

$$= \frac{\text{geleistete Arbeit an den Werkmaschinen}}{\text{Gesamtarbeit des Motors}}; \text{ oder}$$

$$= \frac{\text{zur Ausnutzung verfügbare Arbeit}}{\text{aufgewendete Gesamtarbeit}}.$$

η muss demnach immer einen echten Bruch ergeben und kann nie den Wert Eins haben. Man kann den Wert von η mit 100 multiplizieren und erhält dann die verfügbare Arbeit in %. Diese % Zahlen bezeichnet man in der Praxis auch mit dem Ausdruck »Nutzeffekt«. Multipliziert man die Differenz $1{,}00 - \eta$ mit 100, dann erhält man den Arbeitsverlust in %. Bei der einfachen Angabe des Wirkungsgrades setzt man immer voraus, dass der Motor mit Vollbelastung arbeitet.

Digitized by Google

Der besseren Übersicht wegen wollen wir das hier zu behandelnde Thema in nachstehend angedeuteter Weise einteilen:

1. Die (mechanische) Kraftübertragung mittels Riemen, Seilen und starren Wellen;

2. die (hydraulische) Kraftübertragung mittels Röhren, in welche Wasser gepresst wird;

3. die (pneumatische) Kraftübertragung mittels Röhren, in welche Luft gepresst wird;

4. die Kraftübertragung mittels Elektricität.

Es liegt nicht in der Absicht des Autors, hier Beschreibungen der einzelnen Teile zu bringen; so weit als möglich werden Beispiele das Wesentliche der Sache erläutern, um unseren Betrachtungen einen festen Halt zu geben und um dann sachliche und rechnungsmässige Vergleiche zu ermöglichen. Auch einige der Haupt- und Grundgleichungen, soweit sie für die Praxis wichtig sind, sollen den einzelnen Abteilen eingefügt werden.

Die mechanische Kraftübertragung.

Zur mechanischen Kraftübertragung im engeren Sinne rechnen wir hier alle Vorrichtungen, die nötig sind, wenn Energie mittels Riemen oder Seilen auf Scheiben übertragen werden soll, wobei letztere auf Wellen befestigt sind, von denen die Energie mittels Scheiben und Riemen den Werkmaschinen zugeführt wird. Hierher gehören auch die Zahnradübertragungen.

Betrachten wir vorerst die Grundgleichungen, welche bei jeder mechanischen Übertragung vor allem berücksichtigt werden sollen.

Bedeutet v die Umfangsgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde;
r_1 und r_2 die Radien zweier abhängig voneinander arbeitender Räder;
n_1 und n_2 die beziehungsweisen Umdrehungszahlen in der Minute;
P die Umfangskraft;
N den Effekt in Pferdestärken (P. S.);
z_1 und z_2 die Zahnzahlen zusammenwirkender Zahnräder, so wird:

$$v = \frac{2\pi r_1 n_1}{1000 \times 60} = \frac{2\pi r_2 n_2}{1000 \times 60}$$ und daraus folgt, dass $n_1 r_1 = n_2 r_2$,

beziehungsweise auch $n_1 z_1 = n_2 z_2$;

ferner:

$$P = \frac{75\,N}{v}.$$

Bekanntlich werden Transmissionswellen auf Verdrehung und Verbiegung beansprucht; die bezüglichen Koëffizienten seien mit k_d und k_b bezeichnet und beziehen sich dieselben auf den vollen Kreis-

Digitized by Google

querschnitt und die zulässige Beanspruchung pro 1 *qcm*. Nun ist das drehende Moment

$$M_d = k_d \frac{\pi}{16} d^3 \text{ oder } = \sim \frac{1}{5} k_d d^3.$$

Als geringstes Maass für Durchmesser solcher Wellen bezeichnet man 45 *mm*; sonst werden die Wellendurchmesser gerechnet

bei Gusseisen nach der Formel $d = 15 \sqrt[3]{\frac{N}{n}}$ in *cm*;

» Schmiedeeisen » » » $d = 12 \sqrt[3]{\frac{N}{n}}$ in *cm*;

» Gussstahl » » » $d = 10 \sqrt[3]{\frac{N}{n}}$ in *cm*.

Eine vielfach angewendete Formel für schmiedeeiserne Wellen lautet:

$$d = \sim 120 \sqrt[4]{\frac{N}{n}} \text{ in } mm.$$

Im allgemeinen geht man dabei von der Formel aus:

$$75 N = \frac{M_d}{100} \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi^2}{16} \frac{n d^3}{3000} k_d$$

(wenn N die Zahl der zu übertragenden P. S.).

Setzt man $\pi^2 = 9{,}887 = \sim 10$, so wird $d = \sqrt[3]{\frac{360000}{k_d} \frac{N}{n}}$.

Bedeutet P (in *kg*) die Kraft, welche am Hebelarm R (in *mm*) wirkt, so gilt die Formel:

$$PR = \frac{75000 \times 60}{2\pi} \frac{N}{n} = 716200 \frac{N}{n}$$

und ist nach dieser Formel berechnet:

$d = 45$, wenn $\frac{N}{n} = 0{,}020$	und $PR = 14100$
50	0,030	21500
60	0,062	44400
70	0,115	82300
80	0,196	104400
90	0,314	224800
100	0,478	342700
110	0,710	501700
120	0,990	710600
130	1,370	978800 u. s. f.

Digitized by Google

Auch die Formeln:

$d = 2{,}32 \sqrt[4]{PR}$ für Schmiedeeisen und $d = 2{,}76 \sqrt[4]{PR}$ für Gusseisen werden häufig angewendet, wenn d berechnet wird für den Fall, dass die Verdrehung der Welle $^1/_4$ Grad pro laufenden Meter nicht übersteigt.

Wellen aus Gussstahl dürfen 0,8 des Durchmessers gleich beanspruchter schmiedeeiserner Wellen erhalten.

Bei Haupttransmissionen soll die Tourenzahl 100 bis 150 pro Minute nicht überschreiten; bei schnellgehenden Werkmaschinen kann die Tourenzahl der Transmission bis auf 400 erhöht werden.

Das biegende Moment ist in der Praxis zumeist so klein, dass es in der Rechnung ohne Schaden vernachlässigt werden kann und zwar umsomehr, als man bei der Berechnung der Wellendurchmesser ohnehin eher zu viel als zu wenig rechnet; übrigens findet man in C. Bachs bekanntem Lehrbuch der Maschinenelemente die bezüglichen Berechnungen sehr ausführlich und gründlich behandelt.

Fünf- bis sechsfache Sicherheit wählt man für alle Wellen, die von Elementarkräften bewegt werden, und man wählt sogar bis achtfache Sicherheit, wenn die Wellen Stössen ausgesetzt sind oder das Drehungsmoment infolge bedeutender Schwungmassen sehr anwachsen kann.

Die Lagerung der Wellen erfolgt derart, dass bei langen Wellensträngen die Lagerentfernung von Mitte zu Mitte

$$l = \sim 125 \sqrt{d} \text{ in } cm.$$

Demnach wird bei $d =$	3	4	5	6	7	8	9	10	12	cm
$l =$	210	240	280	300	330	350	370	400	430	»

Lokale Verhältnisse werden aber wohl auf das Anbringen der Lager vielfach bestimmend einwirken.

Bei stärkerer Belastung rechne man nach der Formel:

$$l = \sim 135 \sqrt[3]{d} \text{ in } cm.$$

Auf die Ausdehnung der Wellen infolge Erwärmung ist sowohl bei der Berechnung der Welle als bei der Anordnung der Lager Rücksicht zu nehmen. Das Anbringen von Nuten, das Eindrehen, das Abplatten und andere Schwächungen des Querschnitts der Wellen sind zu vermeiden; wenn nicht, so darf zur Beurteilung des ganzen Wellenstückes immer nur der verringerte Querschnitt in Rechnung gezogen werden.

Auf den Wirkungsgrad der Transmission hat der Kraftverlust infolge Zapfenreibung in den Lagern wohl den bedeutendsten Einfluss. Dieser Verlust ist direkt proportional der Umdrehungs-

Digitized by Google

geschwindigkeit bezw. dem Durchmesser der Welle. Als mittlere Geschwindigkeit der reibenden Fläche eines runden Zapfens ist Zweidrittel von der Geschwindigkeit am äusseren Umfange des Zapfens in Rechnung zu bringen.

Bei einem Durchmesser des Zapfens in Millimetern	Von der Zapfenreibung konsumierte Arbeit in Meter-Kilogramm pro Sekunde für $f = 0{,}075$ und $P = 100\ kg$ bei der Anzahl der Umdrehungen pro Minute von							
	50	75	100	150	200	250	300	400
10	0,131	0,196	0,262	0,393	0,524	0,655	0,786	1,048
11	0,144	0,216	0,288	0,432	0,576	0,720	0,865	1,152
12	0,157	0,236	0,314	0,472	0,629	0,786	0,943	1,258
13	0,170	0,255	0,341	0,511	0,681	0,851	1,022	1,362
14	0,183	0,275	0.367	0,550	0,734	0,917	1,100	1,467
15	0,196	0,295	0,393	0,589	0,786	0,982	1,179	1,572
16	0,210	0,314	0,419	0,629	0,838	1,048	1,258	1,676
17	0,223	0,334	0,445	0,668	0,891	1,113	1,336	1,780
18	0,236	0,354	0,472	0,707	0,943	1,179	1,415	1,886
19	0,249	0,373	0,498	0,747	0,996	1,244	1,493	1,991
20	0,262	0,393	0,524	0,786	1,048	1,310	1,572	2,096
22	0,288	0,432	0,576	0,865	1,153	1,441	1,729	2,305
24	0,314	0,472	0,629	0,943	1,258	1,572	1,886	2,515
25	0,327	0,491	0,655	0,982	1,310	1,637	1,965	2,620
26	0,341	0,511	0,681	1,022	1,362	1,703	2,044	2,724
28	0,367	0,550	0,734	1,100	1,467	1,834	2,208	2,934
30	0,393	0,589	0,786	1,179	1,572	1,965	2,358	3,144
35	0,458	0,688	0,917	1,375	1,834	2,292	2,751	3,668
40	0,524	0,786	1,048	1,572	2,096	2,620	3,144	4,192
45	0,589	0,884	1,179	1,768	2,358	2,947	3,537	4,716
50	0,655	0,982	1,310	1,965	2,620	3,275	3,930	5,240
55	0,720	1,081	1,441	2,161	2,882	3,602	4,333	5,764
60	0,786	1,179	1,572	2,358	3,144	3,930	4,716	6,288
65	0,851	1,277	1,703	2,554	3,406	4,257	5,109	6,812
70	0,917	1,375	1,834	2,751	3,668	4,585	5,502	7,336
75	0,982	1,474	1,965	2,947	3,930	4,912	5,895	7,860
80	1,048	1,572	2,096	3,144	4,192	5,240	6,288	8,384
85	1,113	1,670	2,227	3,340	4,454	5,567	6,681	8,908
90	1,179	1,768	2,358	3,537	4,716	5,895	7,074	9,432
95	1,244	1,867	2,489	3,733	4,978	6,222	7,467	9,956
100	1,310	1,965	2,620	3,930	5,240	6,550	7,860	10,480
110	1,441	2,161	2,882	4,323	5,764	7,205	8,646	11,828
120	1,572	2,358	3,144	4,716	6,288	7,860	9,432	12,576
130	1,703	2,554	3,406	5,109	6,812	8,515	10,218	13,624
140	1,834	2,751	3,658	5,502	7,336	9,170	11,504	14,672
150	1,965	2,947	3,930	5,895	7,860	9,725	11,790	15,720
160	2,096	3,144	4,192	6,288	8,384	10,480	12,576	16,768
170	2,227	3,340	4,454	6,771	8,908	11,125	12,862	17,816
180	2,358	3,537	4,716	7,073	9,432	11,790	14,148	18,864
190	2,489	3,733	4,978	7,467	9,956	12,455	14,934	19,912
200	2,620	3,930	5,240	7,860	10,480	13,100	15,720	20,961

Digitized by Google

Der Reibungskoëffizient f für schmiedeeiserne, stählerne oder gusseiserne, gut geschmierte Zapfen auf den gebräuchlichen Lagermetallen kann gleich 0,075 angesetzt werden.

Die von der Reibung eines Zapfens konsumierte Arbeit bei der Belastung P ist daher

$$= \frac{2}{3}\frac{d\pi n}{60} Pf \quad \text{in } m/kg \text{ pro Stunde}$$
$$= 0{,}0349\, dnPf \text{ » » » »}$$

Die Tabelle auf Seite 5 zeigt die von der Reibung konsumierte Arbeit für eine konstante Belastung von 100 *kg*, bei verschiedenen Umdrehungszahlen und verschiedenem Zapfendurchmesser, wenn $f = 0{,}075$.

Korrekte Konstruktion der Lager und gute Schmierung werden auf die Höhe des Wirkungsgrades hauptsächlich bestimmend einwirken. Man giebt den Rotgussschalen für Transmissionslager günstig eine Länge $l = 1{,}5\, d$, und gusseisernen Lagerschalen $l = 4\, d$ (wenn d = Wellendurchmesser). Die Stärke der Rotgussschalen setzt man gleich $\frac{d}{16} + 5$ *mm*.

Auf die weitere Beschreibung der Konstruktion der verschiedenen Lager können wir uns natürlich nicht einlassen und empfehlen nur sehr die Anwendung der »Sellers Lager« und vor allem die bestens bewährte Ringschmierung.

Es ist z. B. die Aufgabe gestellt, eine Fabrik mit mechanischen Transmissionen einzurichten und zwar sollen:

im I. Stockwerk 20 P.S. bei 80 Touren pro Minute
» II. » 15 » » 100 » » »
» III. » 10 » » 120 » » » übertragen werden.

Wie gross müssen die Wellendurchmesser sein, wenn in den zwei ersten Stockwerken Schmiedeeisen, im dritten aber Gussstahl für die Wellen verwendet werden soll. Die Wellen sind je 60 *m* lang; wie gross wird die Längenänderung bei 40° Temperaturdifferenz?

Für das I. Stockwerk ist $\frac{N}{n} = \frac{20}{80} = 0{,}25$;

also:
$$d_1 = 12\sqrt[3]{\frac{N}{n}} = 12\sqrt[3]{0{,}25} = 12 \times 0{,}6 = 7{,}2\ cm = 72\ mm;$$

oder:
$$d_1 = 12\sqrt[4]{\frac{N}{n}} = 12\sqrt[4]{0{,}25} = 12 \times 0{,}7 = 8{,}4\ cm = 84\ mm.$$

Mit Bezug auf die nötige Sicherheit wird man
$d_1 = 90\ mm$ wählen.

Für das II. Stockwerk ist $\frac{N}{n} = \frac{15}{100} = 0{,}15$;

die analogen Rechnungen wie oben ergeben:
$d_2 = 60\ mm$ oder $d_2 = 72\ mm$; endgiltig wird man
$d_2 = 80\ mm$ wählen.

Digitized by Google

Für das III. Stockwerk ist Gussstahl zu verwenden und es wird

$$\frac{N}{n} = \frac{10}{120} = 0{,}0833;$$

$$d_3 = 10 \sqrt[3]{\frac{N}{n}},$$ was schliesslich ungefähr 60 *mm* ergiebt.

Die Ausdehnungskoëffizienten, für Schmiedeeisen im Mittel zu $\frac{1}{80000}$, für Stahl im Mittel zu $\frac{1}{90000}$ auf 1° C. angenommen, ergeben Längenänderungen von

$$60 \times \frac{40}{80000} = \frac{3}{100}\, m = 30\ mm \text{ bezw. } 60 \times \frac{40}{90000} = 26{,}6\ mm.$$

Beim Riemenantrieb sitzt auf der treibenden und angetriebenen Welle je eine Riemenscheibe; auf diese wird der Riemen aufgelegt und ist die Spannung beider Riemenhälften im Ruhezustand gewöhnlich die gleiche (Fig. 1). Beim Betrieb hat die untere Hälfte (auflaufender oder ziehender Riementeil) eine grössere Spannung (T_1) als die obere

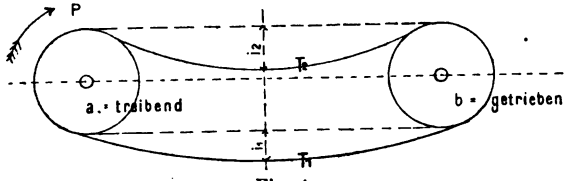


Fig. 1.

(ablaufende) Riemenhälfte; die Spannung (T_2) nimmt in diesem Teil ab. Die Zugkraft (in *kg*) P, welche am Umfang der getriebenen Riemenscheibe wirkt, ist gleich der Differenz der Spannungen ($P = T_1 - T_2$). Die übertragene Arbeit $A = Pv = (T_1 - T_2)\, v$ in *m/kg* pro Sekunde. Nun ist bekanntlich

$$v = \frac{2r\pi n}{60}, \text{ demnach } A = P\frac{2r\pi n}{60} \text{ in } m/kg$$

$$\text{und } A = P\frac{2r\pi n}{60 \times 75} \text{ in P. S.}$$

$$\text{oder } A = 0{,}001396\, Prn \text{ und } P = 716\,\frac{A}{nr}.$$

Lederriemen können mit 0,100 bis 0,125 *kg* pro 1 *qmm* beansprucht werden ($k = 0{,}100$ bis $0{,}125$).

Die Riemenbreite $b = \frac{P}{dk} = \frac{75\,A}{dkv} = \frac{716\,A}{dknr}$

(wobei d = Riemendicke).

Die Riemengeschwindigkeit soll 30 *m* in der Sekunde in keinem Fall übersteigen.

Digitized by Google

Tabelle I zur Berechnung von Leder-Treibriemen.

(Wenn $k = 0{,}100$.)

Riemenbreite b	Riemendicke d	Zulässige Zugkraft P		Übertragbare Arbeit in Pferdestärken für eine Riemengeschwindigkeit v von		
		für 1 mm Riemenbreite	für den ganzen Riemen	15 m in 1 Sekunde	20 m in 1 Sekunde	25 m in 1 Sekunde
mm	mm	kg	kg			
50	4	0,4	20	4,00	5,33	6,67
60	4	0,4	24	4,80	6,40	8,00
70	5	0,5	35	7,00	9,33	11,6
80	5	0,5	40	8,00	10,64	13,3
90	6	0,6	54	11,0	14,7	18,3
100	6	0,6	60	12,0	16,0	20,0
110	6	0,6	66	13,2	17,6	22,0
120	7	0,7	84	16,8	22,4	28,0
130	7	0,7	91	18,2	24,3	30,3
140	7	0,7	98	19,6	26,1	32,7
150	7	0,7	105	21,0	28,0	35,0
160	7	0,7	112	22,4	29,9	37,3
180	7	0,7	126	25,2	33,6	42,0
200	7	0,7	140	28,0	37,3	46,7
250	8	0,8	200	40,0	53,3	66,7
300	8	0,8	240	48,0	64,0	80,0
350	8	0,8	280	56,0	74,7	93,3
400	8	0,8	320	64,0	85,3	107
450	8	0,8	360	72,0	96,0	120
500	8	0,8	400	30,0	106	133

Tabelle II über Leder-Treibriemen.

1. Riemenbreite in mm	$b =$	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
2. Dicke des Riemens in mm	$d =$	4	4,7	5,2	5,6	6,0	6,2	6,5	6,7	6,9	7	7,3
3. Inanspruchnahme in kg von 1 qmm Querschnitt	$k =$	0,16	0,19	0,21	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28
4. kg Umfangskraft pro 1 mm Riemenbreite	$p =$	0,32	0,42	0,54	0,64	0,71	0,77	0,84	0,90	0,97	1,00	1,22
5. Umfangskraft . . .	$P =$	16	42	81	128	177	231	294	360	432	500	730

Viel gebrauchte Formeln zur Berechnung von b lauten:

$$1.\ b = 18\sqrt{P}; \qquad 2.\ b = 15250\sqrt{\frac{N}{r\,n}};$$

$$3.\ b = 156\sqrt{\frac{N}{v}}; \qquad 4.\ b = 615\sqrt[3]{\frac{b}{r}\,\frac{N}{n}}.$$

Digitized by Google

Das Riemengleiten veranlasst Verluste an Kraft und Geschwindigkeit von 2 bis 5 %.

Wenn z. B. $n = 100$; $r = 120$ *cm* und $b = 16$ *cm*, so kann man $\frac{16 \times 120 \times 100}{18000} = 10{,}66$ P. S. übertragen.

Bei Doppelriemen würde man statt 18000 nur 13000 anzusetzen haben.

Die Riemenscheibenbreite $B = 1{,}1\,b + 10$ *mm*.

Den Riemenauflagen soll eine Wölbung von 5 bis 2 % der Pfeilhöhe gegeben werden.

Die Anzahl der Arme einer eisernen Riemenscheibe sei:

$$A = \frac{1}{6}\sqrt{2r}.$$

Die Breite der Arme sei:

$$b_1 = 1{,}5\sqrt[3]{\frac{b\,d\,r}{A}} \text{ am Centrum,}$$

$$b_2 = \frac{2}{3}\,b_1 \text{ am Kranz}$$

(b = Riemenbreite; d = Riemendicke; r = Scheibenradius).

Kraftverluste beim Riemenantrieb.

Die Grösse des Achsendruckes ist mit $2 \times 3\,P$ anzusetzen, weil bei jeder Achse der Lagerdruck gleich ist der dreifachen Umfangskraft ($T_1 + T_2 = 3\,P$).

Ist der Reibungskoëffizient $f = 0{,}10$, die Zapfendicke $^1/_{16}$ des Scheibendurchmessers, so ist die Lagerreibung der 0,037. Teil ($3f\,[^1/_{16} + ^1/_{16}] = 3 \times 0{,}10 \times \frac{2}{16} = 0{,}037$) der Umfangskraft P; d. h. der Kraftverlust beträgt 3,7 % für jedes Scheibenpaar. Kann bei sehr gut gehaltenen und geschmierten Lagern $f = 0{,}07$ angesetzt werden, so sinkt der Verlust auf $\frac{0{,}07}{0{,}10} \times 3{,}7 = 2^1/_2$ % der übertragenen Arbeit.

Weitere 2 % Geschwindigkeitsverlust werden durch die verschiedenen Spannungen in beiden Riemenhälften veranlasst, wenn man die Inanspruchnahme des Riemens durch die Spannung $T_1 = 2\,P$ zu 24 *kg* pro *qcm* Riemenquerschnitt und den Elastizitätsmodul des Leders zu 600 *kg* pro *qcm* annimmt. Bei sehr guten und nicht neuen Riemen kann man jenen Modul mit 1500 und sogar 2000 statt 600 ansetzen und dann verringert sich der Geschwindigkeitsverlust bis auf 0,66 % für die einmalige Übersetzung.

Digitized by Google

Jene Kraftverluste, welche durch die Steifheit des Leders veranlasst werden, sind ziffermässig wohl nicht zu normieren; immerhin kann man Werte von 0,25 bis 1,5 % der übertragenen Arbeit als Kraftverluste annehmen und bei der Berechnung des Wirkungsgrades einsetzen.

Wir summieren nun für die einstufige Übersetzung:

Kraftverlust durch	Lagerreibung	2,5 bis	3,7 %
»	» Verlust an Geschwindigkeit	0,66 »	2,0 %
»	» Steifheit des Riemens . .	0,25 »	1,5 %
	Totaler Kraftverlust	3,41 bis	7,2 %

Das sind die nach exakt ausgeführten Versuchen ermittelten Ziffern. Aus den praktisch festgestellten Messresultaten, welche in den Beispielen auf Seite 14 ff. mitgeteilt sind, kann man ersehen, wie sehr die Verhältnisse in der Wirklichkeit durch Nebenumstände beeinflusst werden. Fehler in der Ausbalancierung der Riemenscheiben, Mängel in den Lagerschalen und Achsenzapfen, zu knapp bemessenes Gewicht, unrichtige Materialverteilung bei der Konstruktion, mangelhafte Montage und daraus resultierende Vibrationen und viele andere Nebenumstände veranlassen Kraftverluste, die ziffermässig nicht genau präzisiert werden können, den Wirkungsgrad aber oft in gewaltiger Weise herabdrücken.

Die Erhaltungskosten pro Jahr und 1 *m* Riemenlänge belaufen sich auf ca. ℳ 7,—.

Bei Hanfseiltrieben gelten ähnliche Gesichtspunkte wie bei Betrieben mit Lederriemen.

Zur Verwendung gelangen Hanfseile von Querschnittsdurchmessern

$$d = 25 \quad 30 \quad 35 \quad 40 \quad 45 \quad 50 \; mm.$$

Der Gesamtquerschnitt der zur Übertragung einer gegebenen Kraft bei gegebener Tourenzahl erforderlichen Seile wird nach der Formel

$$q = 12 \frac{N}{v} \text{ in } qcm \text{ vermittelt,}$$

wobei v nicht grösser als 20 *m* pro Sekunde gewählt werden soll.

Die Zahl der Seile (i) berechnet man nach der Formel:

$$i = \frac{P}{5{,}5\, d^2} \text{ bis } i = \frac{P}{3\, d^2}.$$

Eine einfache Regel lautet:

Wenn man 50 *mm* dicke Seile verwendet, so nehme man von

von	15	P. S. an	zwei Seile
»	30	» »	drei »
»	50	» »	vier »
»	100	» »	sechs »
»	200	» »	zehn »

Digitized by Google

Tabelle über Hanfseiltriebe.

Seildurchmesser	30	35	40	45	50 *mm*
Nutzbelastung	35	50	60	80	100 *kg*
Kleinster Seilscheibendurchmesser .	900	1050	1280	1350	1500 *mm*
Seil aus Manilahanf wiegt pro Meter	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8 *kg*
Seil aus badischem Spleisshanf wiegt pro Meter	0,7	1,0	1,3	1,6	1,9 *kg*
Baumwollseil wiegt pro Meter . . .	0,65	0,95	1,2	1,6	1,9 *kg*

Bezüglich des Baues der Seilscheiben gelten fast die gleichen Regeln wie bei der Konstruktion der Riemenscheiben; nur ist hier im Interesse der Erzielung eines hohen Wirkungsgrades dringend geboten, die Seilrinnen mit grösster Sorgfalt zu drehen. Je kleiner der Winkel, den die Flanken der Rinne einschliessen, desto grösser ist die wünschenswerte Reibung zwischen Seil und Rinne, desto schlaffer darf das Seil laufen und desto geringer ist auch der Achsendruck. 43° bis 45° sind zumeist angewandte Maasse.

Der kleinste Scheibendurchmesser sei wenigstens das 25fache des Seildurchmessers.

Die Achsenentfernung sei ungefähr das $1^1/_2$fache der Summe der beiden Seilscheibendurchmesser.

Die Erhaltungskosten pro 1 Betriebsjahr und 1 *m* Seillänge sind mit etwa ℳ 3,— anzusetzen. Die Anschaffungskosten sind jenen gleich, die durch Lederriemen veranlasst werden.

Drahtseiltriebe sind nur auf Entfernungen von 20 bis 150 *m* rationell. Man verwendet dabei Drahtseile von 8 bis 20 *mm* Querschnittsdurchmesser, aus 36 oder 42 Einzeldrähten gedreht. Im allgemeinen gilt die Norm, dass ein Seil von Durchmesser

d = 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 *mm*

die Umfangskraft

P = 55 70 87 105 125 147 170 195 223 252 282 314 348 *kg*

bei einem Scheibendurchmesser

D = 1400 1575 1750 1925 2100 2275 2450 2625 2800 2975 3150 3325 3500 *mm*

überträgt.

Drahtseile werden bei Kraftübertragungen auf weitere Entfernungen ca. alle 100 *m* durch Seilscheiben gestützt, sodass immer zwei solche Scheiben zu je einer Drahtseilschleife gehören. Die Durchsenkung des treibenden Seilstückes beträgt bei horizontaler Spannung ca. 1,5 *m*, im leerlaufenden Seilstück ca. 3 *m*. Die Seilgeschwindigkeit beträgt meistens 6 bis 10 *m*, kann aber bis 25 *m* gesteigert werden (Fig. 2, 3, 4 und 5).

Wir können uns hier nicht weiter auf die Konstruktion der Seiltriebe einlassen und verweisen auf das kürzlich über diesen Gegenstand veröffentlichte Werk des Verfassers »Die Kraftübertragung auf weite Entfernungen«, Band I, Seite 115 ff.

Digitized by Google

Auch hier unterscheiden wir bei Hanfseiltrieben vier Umstände, welche Kraftverluste veranlassen:

1. die Zapfenreibung,
2. der Luftwiderstand,
3. das Gleiten des Seiles und
4. die Steifigkeit des Seiles.

Am bedeutendsten ist der Arbeitsverlust infolge der Zapfenreibung.

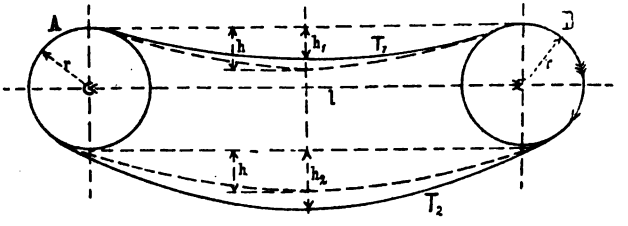


Fig. 2.

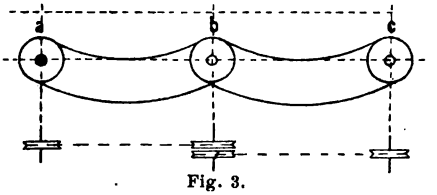


Fig. 3.

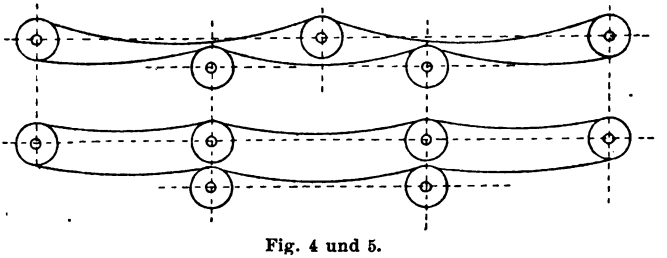


Fig. 4 und 5.

Bedeutet f den Koëffizienten der Zapfenreibung, d den Durchmesser des Zapfenquerschnitts, r den Radius der Scheibe, p die Kraft, welche am Umfange der Rolle wirken muss, um das Moment der Zapfenreibung zu überwinden, so ist:

$$f\,(T_1 + T_2)\,\frac{d}{2} = p\,r, \text{ woraus folgt, dass}$$

$$\frac{2\,p}{P} = f\,\frac{T_1 + T_2}{P}\,\frac{d}{r}.$$

Kann man, was zumeist zulässig ist, annehmen:

$$f = 0{,}1; \quad \frac{d}{r} = \frac{1}{15}; \quad T_1 + T_2 = 3\,P,$$

Digitized by Google

so wird $$\frac{2p}{P} = 0{,}1 \times 3 \times \frac{1}{15} = 0{,}02,$$

d. h. durch die Zapfenreibung gehen 2% der Arbeit verloren.

Zur Überwindung des Luftwiderstandes, der bei langen Leitungen nicht unberücksichtigt bleiben kann, rechnet man $^1/_8$% der zu übertragenden Energie für 30 *m*, also rund für 100 *m* 1%.

Der Verlust durch Gleiten kann bei Drahtseiltrieben vernachlässigt werden. Will man aber ganz exakt rechnen, so ist er höchstens mit $^1/_{50}$% für eine Scheibe anzusetzen.

Bei Seilbetrieben biegt sich das Seil beim Anlaufen etwas ab, schmiegt sich dagegen beim Ablaufen etwas an, so dass der Radius einerseits (m_1) etwas grösser, anderseits (m_2) etwas kleiner wird. Wir erhalten:

$$Pr = T_1 (r + m_1) - T_2 (r - m_2).$$

Nun kann man aber setzen: $m_1 = m_2 = m$

und da bekanntlich $T_1 + T_2 = 3P$,

wird $$P = (T_1 - T_2) - \frac{3m}{r} p.$$

Ohne Steifheit des Seiles ist $P = T_1 - T_2$, sodass der Wert $\frac{3mp}{r}$ den Verlust durch die Seilsteifigkeit ausdrückt. Wir können für die Praxis genügend genau diesen Wert gleich 0,5% pro Rolle, also 1% für ein Rollenpaar ansetzen, und summieren nun:

Kraftverlust infolge Zapfenreibung	2%
» » Luftwiderstand	1%
» » Seilsteifigkeit	1%
d. s. zusammen	4%

für 100 *m* Übertragung mittels eines einzigen Rollenpaares.

Das wäre ein Wirkungsgrad von $\eta = 0{,}96$ für die ersten 100 *m*. Anfangs genügt es, für je weitere 100 *m* den Wert für η ca. 0,01 niedriger anzusetzen, da die Kraftverluste in den Zwischenstützpunkten erfahrungsgemäss gering sind, also für

200 *m*	$\eta = 0{,}95$
300 *m*	$\eta = 0{,}94$
1000 *m*	$\eta = 0{,}87$ u. s. f.

Wenn nun auch η für 1 *km* Entfernung noch befriedigend ist, so sinkt dieser Wert auf weitere Entfernungen sehr bedeutend und ist η

für 5 *km* nur mehr	= 0,605
» 10 *km*	= 0,366
» 20 *km*	= 0,134.

Hirn bestätigt für die Praxis den oben angesetzten Wert von $\eta = 0{,}96$, da er beim Versuch einer Übertragung von 120 P. S. auf

Digitized by Google

150 *m* bei 21 *m* Seilgeschwindigkeit und 100 Touren in der Minute nicht mehr als 4 P. S. verloren hat. Dabei gab er den beiden Scheiben je 4 *m* Durchmesser und dem Seile eine Stärke von 12 *mm*.

Bei der bekannten Anlage in Oberursel bei Frankfurt a. M., wo 100 P. S. in acht Zwischenstationen auf 1000 *m* übertragen werden, verursacht jede der Zwischenstationen einen Verlust von 1 P. S.; denn von den 100 P. S. der ersten Scheibe kommen 92 P. S. an den Bestimmungsort.

Beispiele.

1. Beispiel (nach E. Hartmann).

Eine Fabrik hat eine Dampfmaschine von 250 P. S. Leistungsfähigkeit. Der mittlere Tagesbetrieb erfordert 175 P. S. Der Leerlauf sämtlicher Gestängtransmissionen erfordert, wie mit dem Indikator und dem Prony'schen Bremszaum ermittelt worden ist, 80 P. S.

Wir erhalten daher folgende Wirkungsgrade:

I. für den Vollbetrieb:

$$\eta_1 = \frac{250-80}{250} = 0{,}68;$$

II. für den Normalbetrieb:

$$\eta_2 = \frac{175-80}{175} = 0{,}543.$$

Die Transmission nimmt also von 250 P. S. volle 80 P. S. in Anspruch.

2. Beispiel (ebenfalls nach E. Hartmann).

Zur Verfügung stand ein sechspferdiger Motor, welcher 51 kleinere Werkzeugmaschinen, als: feine Drehbänke, Fraismaschinen, Bohrmaschinen, Schleifmaschinen u. s. w., durch eine besondere gemeinschaftliche Transmission antreiben musste. Die betreffende Welle war 40 *mm* dick, 28 *m* lang und daher stark besetzt. Die Versuche an dieser Übertragung wurden nach drei Stufen ausgeführt:

I. Stufe. Betrieb zwischen Maschinen und Vorgelegen,
II. » » » Vorgelege und Haupttransmission
und III. » » » Haupttransmission und Motor.

Die Messungen haben ergeben: Kraftbedarf

beim Vollbetrieb	494	*m/kg*
beim Leergang	396	»
für Transmission und Vorgelege bei abgeworfenem Maschinenriemen	197	»
für Transmission und Vorgelegriemen an der Losscheibe	148	»
für Transmission allein mit Hauptriemen	97,7	»

Daraus berechnet sich:

die Nettoarbeit 494 — 396 =	98	»
der Vollbetrieb der Maschine 494 — 197 =	297	»
der Leerlauf der Maschine 396 — 197 =	199	»
der Kraftbedarf der Maschinenriemen und Vorgelege 197 — 148 =	49	»
der Kraftbedarf der Transmissionsriemen 148 — 79,7 =	68,3	»
der Kraftbedarf der Transmission samt Hauptriemen	97,7	»

Digitized by Google

Wir erhalten also die Wirkungsgrade:

der Maschine selbst im Mittel $\frac{98}{297} = 0{,}33$

I. Stufe $\frac{297}{297+49} = 0{,}86$

II. » $\frac{346}{346+68{,}3} = 0{,}835$

III. » $\frac{414{,}3}{414{,}3+79{,}7} = 0{,}84.$

Der drei Stufen zusammen $0{,}86 \times 0{,}835 \times 0{,}84 = 0{,}605$
und der Transmissionsteile allein $0{,}835 \times 0{,}84 = 0{,}70.$

3. Beispiel.

Eine Schrotmühle, zu deren Betrieb 7 P.S. verwendet wurden, braucht nach genauen Indikatormessungen an Betriebskraft:

I. Stufe: Riemen zwischen Vorgelege und Schrotmühle . . 0,2 P.S.
II. » Vorgelegwelle, 26 *m* lang, 40 *mm* stark, samt Riemen 2,7 »
III. » Primärtransmission, 60 *m* lang, 40 *mm* stark, samt Antriebriemen . . . . . 3,8 »
zusammen 6,7 P.S.

Demnach Gesamtwirkungsgrad der Transmission:

$$\eta = \frac{7}{7+6{,}7} = 0{,}51.$$

4. Beispiel.

Nach mehrfachen Ermittelungen leistet ein Handweber ca. die Hälfte des mechanischen Webstuhles, wenn die Waare einfach ist und der Handstuhl keine zu grosse physische Kraft erfordert, wie z. B. bei der Seidenweberei. In allen anderen Fällen aber nimmt die Leistung des Handstuhles gegenüber dem mechanischen Webstuhl rasch ab, da man bei letzterem an körperlichen Kraftaufwand nicht gebunden ist und ferner einer Person in der Regel mehr als einen solchen Stuhl zur Bedienung überweisen kann. Allerdings und leider liegen diesbezüglich noch keine exakten ziffernmässigen Angaben vor, immerhin sind die nachstehenden angewendeten Ziffern Resultate fachmännischer Erwägungen.

Gegeben sind für eine Webfabrik 100 P.S. einer Dampfmaschine. Wie viel Webstühle können betrieben werden?

Ein Webstuhl für mittleres Baumwollenzeug braucht ungefähr 0,25 P.S.
» » » Grobzeug braucht ungefähr . . . . . 0.40 »

Nun rechnet man aber in beiden Fällen für die Transmission 0,33 P.S., also
für mittleres Zeug . . . . . $0{,}25 + 0{,}33 = 0{,}58$ P.S.
» Grobzeug . . . . . $0{,}42 + 0{,}33 = 0{,}75$ »

Man kann daher

$\frac{100}{0.58} = \sim 170$ Webstühle für mittleres Zeug und

$\frac{100}{0{,}75} = \sim 130$ » » Grobzeug betreiben.

Das entspricht Gesamtwirkungsgraden von 0,44 bezw. 0,57; und das ist gut gerechnet; denn aussergewöhnliche Widerstände, z. B. in den Lagern, infolge Setzungen der Mauern und Fundamente, Verziehen der Schrauben, dann Riemengleiten u. s. f. sind dabei noch nicht berücksichtigt.

Digitized by Google

Diese Werte entstammen zumeist den Angaben des Herrn Oberingenieur E. Hartmann, welche derselbe in einem Vortrage im Verein deutscher Ingenieure (Berlin, 6. April 1892) gemacht hat und die auf exakten Messungen beruhen, welche zum Teil in den Werkstätten der Allg. Elektricitäts-Gesellschaft in Berlin angestellt worden sind.

Demnach ergeben die Hartmann'schen Arbeiten folgendes Resultat:

Wirkungsgrade bei mechanischen Übertragungen:

	wenn die Wellen schwach	gut	voll	besetzt sind
Wirkungsgrad der I. Stufe	0,395	0,860	0,930	» »
» » II. »	0,693	0,835	0,915	» »
» » III. »	0,762	0,840	0,775	» »
Gesamtwirkungsgrad:				
2stufig, bei Vollbelastung	0,521	0,700	0,710	Mittel 0,644
3 » » »	0,206	0,605	0,660	» 0,490
2 » » $^3/_4$ der »	0,465	0,640	0,645	» 0,583
2 » » $^2/_3$ der »	0,433	0,607	0,620	» 0,553
Mittlere Entfernung der Riemenscheiben .	2,08 *m*	0,55 *m*	0,375 *m*.	

Dabei bedeutet: die I. Stufe den Riemen zwischen Vorgelege und anzutreibender Maschine,
» II. » die Welle des Vorgeleges,
» III. » die Primärtransmission samt Antriebsriemen.

Es stellen sich also die Wirkungsgrade
dreistufiger Transmissionen im Mittel auf 47% (Grenzwerte 13,7 bis 66),
zwei » » » » » 64% (» 52,0 bis 71).

Diese Ziffern bestätigt auch Herr Oberingenieur Richter von der Firma Siemens & Halske, der ebenfalls nach genauen und zahlreichen Messungen in den Charlottenburger Werken der genannten Firma gefunden hat, dass der Wirkungsgrad zweistufiger Transmissionen mit 65,6% angesetzt werden kann.

Ausdehnung und Besetzung der Transmissionsanlage spielen dabei natürlich immer, und wie auch oben gezeigt wurde, einen wesentlichen Faktor.

5. Beispiel. Eine Kraft von 120 P. S. soll 600 *m* weit durch Drahtseile übertragen werden.

120 P.S. sind $120 \times 75 = 900$ *m/kg* pro Sekunde.

Man wählt als günstig 20 *m* pro Sekunde Seilgeschwindigkeit.

Es wird daher die Umfangskraft:

$$P = \frac{9000}{20} = 450 \text{ kg}.$$

Da die Arbeitsspannung T_1 doppelt so gross ist als P, so ist

$$T_1 = 2 \times 450 = 900 \text{ kg} \quad \text{und} \quad T_2 = \frac{1}{2} T_1 = 450 \text{ kg}.$$

Die Biegungsspannung soll sein: $s = 6$ *kg* pro 2 *mm* und die Arbeitsspannung ebenfalls 6 *kg* pro 2 *mm*; die totale Spannung mithin

$$S = 6 + 6 = 12 \text{ kg}.$$

Es ist dann s ebenfalls 900 *kg* und die totale Zugspannung des Seiles

$$S = T_1 + s = 900 + 900 = 1800 \text{ kg}.$$

Der reine Eisenquerschnitt des Seiles wird nun

$$q = \frac{1800}{12} = 150 \text{ qmm}.$$

Digitized by Google

Das Seil erhält diesen reinen Querschnitt, wenn es 7 × 19 Drähte von 1,2 *mm* Stärke erhält, wobei der Durchmesser des Seiles 22 *mm* und das Gewicht pro lfd. Meter $p = 1{,}6$ *kg* beträgt.

Wir wählen für 600 *m* Distanz vier Stationen zu 150 *m*, es ist also $l = 150$ *m*.

Die Einsenkung des treibenden Seilstückes wird:

$$h_1 = \frac{p\,l^2}{8 \cdot T_1} = \frac{1{,}6 \times 150^2}{8 \times 900} = 5\ m,$$

diejenige h_2 im getriebenen Seilstücke

$$h_2 = \frac{p\,l^2}{8 \cdot T_2} = \frac{1{,}6 \times 150^2}{8 \times 450} = 10\ m.$$

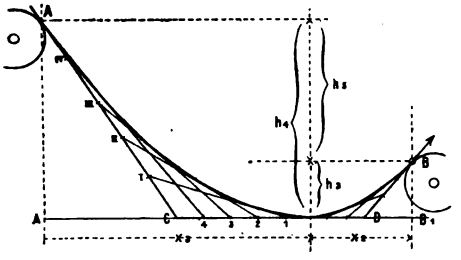


Fig. 6.

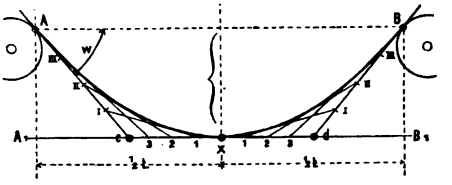


Fig. 7.

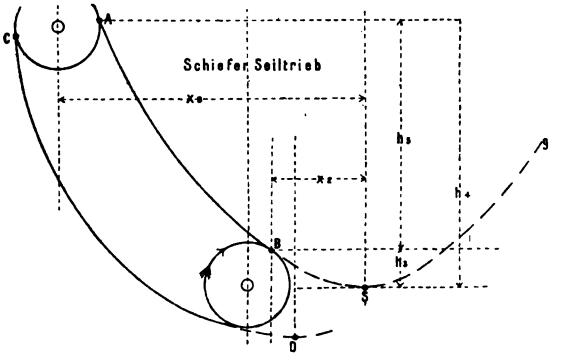


Fig. 8.

Damit der Wert *s* der Biegungsspannung 6 *kg* werde, muss sein:

$$r = \frac{10000\,\delta}{6} = 1666\ \delta.$$

Da unser Seil Drähte von 1,2 *mm* Stärke hat, so wird der Halbmesser der Seilscheiben 1,666 mal 1,2 gleich 1,999, also rund 2 *m*.

6. Beispiel. Zu einem schiefen Seiltrieb sind die nötigen Dimensionen zu berechnen; es ist der horizontal gemessene Abstand der Scheibenachsen 70 *m*; der Vertikalabstand beider Rollenachsen 5,50 *m*. (Die Fig. 6, 7 und 8 zeigen die Konstruktion von Seilkurven und schiefen Seiltrieben.)

Die zu übertragende Kraft sei 90 P. S. Die Arbeitsspannung soll 7 *kg* pro 1 *qmm* Eisenquerschnitt nicht übersteigen.

Die Seilgeschwindigkeit betrage 18 *m*.

Zunächst ist der Seilbetrieb wie ein horizontaler zu berechnen.

Digitized by Google

Es ist die zu übertragende Kraft $90 \times 75 = 6750$ *m/kg* und bei der Geschwindigkeit von 18 *m* wird die Umfangskraft

$$P = \frac{6750}{18} = 375 \text{ kg}.$$

Es ist ferner:

$$T_1 = 2P = 750 \text{ kg} \quad \text{und} \quad T_2 = P = 375 \text{ kg}.$$

Bei der Inanspruchnahme von 7 *kg* durch die Arbeitsspannung T_1 wird der Eisenquerschnitt des Seiles

$$q = \frac{750}{7} = 107 \text{ qmm}.$$

Es entspricht diesem Querschnitt ein Seil von 16 *mm* Stärke im Gewichte von 1,20 *kg* pro lfd. Meter.

Die Pfeilhöhen $h_1 + h_2$ ergeben sich nun zu:

$$h_1 = \frac{p\,l^2}{8 \cdot T_1} = \frac{1{,}20 \times 70^2}{8 \times 750} = 0{,}98 \text{ m}$$

und

$$h_2 = 2\,h_1 = 1{,}960 \text{ m}.$$

Die Pfeilhöhe des ruhenden Seiles ist:

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{0{,}98 + 1{,}960}{2} = 1{,}470 \text{ m}.$$

Um nun die Pfeilhöhen des schiefen Seiltriebes aufzufinden, ist für das treibende Seilstück

$$h_3 = h_1\left(1 + \frac{1}{16}\frac{h_5^2}{h_1^2}\right) - \frac{h_5}{2} = 0{,}98\left(1 + \frac{1}{16}\frac{5{,}5^2}{0{,}98^2}\right) - \frac{5{,}5}{2} = 0{,}200 \text{ m}.$$

Von den höher liegenden Aufhängepunkten aus gerechnet, beträgt also die Pfeilhöhe des treibenden Seilstückes

$$h_3 = 5{,}5 + 0{,}20 = 5{,}70 \text{ m}.$$

Die Pfeilhöhe des getriebenen Seilstückes

$$h_4 = h_2\left(1 + \frac{1}{16}\frac{h_5^2}{h_2^2}\right) - \frac{h_5}{2} = 1{,}170 \text{ m},$$

und diese Pfeilhöhe vom höher liegenden Aufhängepunkt aus gerechnet ist:

$$h_4 = 5{,}5 + 1{,}170 = 6{,}670 \text{ m}.$$

Man kann aus obigem ersehen, dass beim schiefen Seiltrieb die Pfeilhöhe des getriebenen Seilstückes nicht mehr, wie es beim horizontalen Trieb der Fall, das Doppelte der Pfeilhöhe des treibenden Seilstückes ist, dass das Verhältnis beider vielmehr ein ganz anderes wird.

Um die Seilkurven aufzeichnen zu können, muss der Scheitelpunkt der Kurve gesucht werden:

$$x_3 = \frac{l}{2}\left(1 - \frac{1}{4}\frac{h_5}{h_1}\right) = \frac{70}{2}\left(1 - \frac{1}{4}\frac{5{,}5}{0{,}98}\right) = -14 \text{ m},$$

$$x_4 = 70 + 14 = 84 \text{ m}.$$

Bildet man andere Pfeilhöhen, so wird der Wirkungsgrad beeinflusst.

7. Beispiel. Fig. 9 ist ein einfacher Kreisseiltrieb zur Bethätigung einer Centrifugalpumpe; *c* ist eine Spann-, *d* eine Leitrolle. Der Lauf des Seiles ist nach den Nummern 1 bis 10 zu verfolgen.

8. Beispiel. Die Fig. 10 zeigt einen Kreisseiltrieb, der 1893 auf der Ausstellung iu Chicago ausgeführt wurde. Dieser Seiltrieb diente zur Bewegung der sämtlichen Maschinerie in der deutschen Abteilung. Dort wurde die Kraft der Dampfmaschine von 150 P. S. (*a*) durch ein einziges endloses Seil von 45 *mm* Durchmesser und 510 *m* Länge auf vier Wellenstränge (*b, c, d, e*) derart über-

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

tragen, dass sich drei davon in derselben und einer in der entgegengesetzten Richtung drehten. Der Lauf des Seiles ist nach den Nummern 1 bis 34 zu verfolgen. Das Seil umkreiste die Antriebscheibe *a* achtmal, wurde durch den

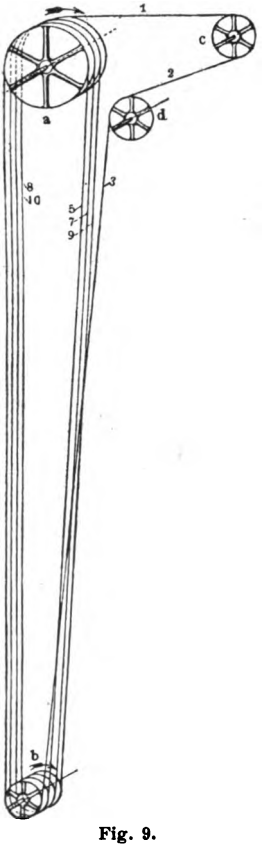


Fig. 9.

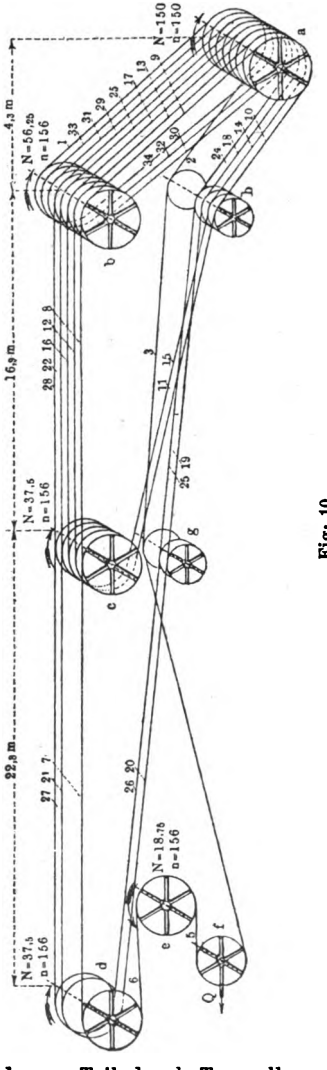


Fig. 10.

Spannwagen *f* gleichmässig gespannt und zum Teil durch Tragrollen *g* und *h* unterstützt.

9. Beispiel. Fig. 11 zeigt die Anordnung einer Kraftverteilung mittels Hanfseilen und genügen die eingeschriebenen Maasse und die anderen Zifferangaben, um das Beispiel genügend zu erläutern und die Kontrolle nach den angegebenen Formeln zu ermöglichen.

Digitized by Google

Die hydraulische Kraftübertragung.

Der Wirkungsgrad hydraulischer Kraftübertragungen wird hauptsächlich durch Arbeitsverluste in den Röhrenleitungen charakterisiert.

Bekanntlich verhalten sich die Durchflussgeschwindigkeiten an beliebigen Stellen einer einfachen Leitung umgekehrt wie die Querschnitte.

Bezeichnet f die Querschnitte, v die Durchflussgeschwindigkeiten zu einer beliebigen Zeit t, so ist:

$$V = f_1 v_1 t = f_2 v_2 t \quad \text{und daher} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Der spezifische Druck p an jeder beliebigen Stelle kann berechnet werden aus $p = h\gamma =$ Höhe in $m \times 1000\ kg$ auf $1\ qm$,
wenn $\gamma =$ Gewicht von $1\ cbm$ Wasser $= 1000\ kg$;
daher ist die Druckhöhe $h = \frac{p}{\gamma} = \frac{p}{1000}$ Meter.

Bezeichnen wir nun mit $h_A = \frac{p_A}{\gamma}$ die hydraulische Druckhöhe bei A, h das Gefälle der Rohrleitung, R die Reibungs- und Widerstandsarbeit in der Strecke A bis B, V das Volumen, so lautet die Arbeitsgleichung:

$$\underbrace{\left(\frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g}\right)}_{\left(\begin{smallmatrix}\text{totale Arbeits-}\\ \text{höhe bei } A\end{smallmatrix}\right)} + h - \left(\frac{p_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g}\right) = \frac{R}{\Delta V \gamma}$$

$$\left(\begin{smallmatrix}\text{totale Arbeits-}\\ \text{höhe bei } A\end{smallmatrix}\right) + \text{Gefälle} - \left(\begin{smallmatrix}\text{totale Arbeits-}\\ \text{höhe bei } B\end{smallmatrix}\right) = \begin{smallmatrix}\text{Differenz der}\\ \text{treibenden und}\\ \text{widerstehenden}\\ \text{Druckhöhen,}\end{smallmatrix}$$

oder besser:

$$\underbrace{\left(\frac{p_A}{\gamma} + \frac{v_A^2}{2g}\right)}_{\left(\begin{smallmatrix}\text{treibende}\\ \text{totale Arbeits-}\\ \text{höhe bei } A\end{smallmatrix}\right)} + h = \left(\frac{p_B}{\gamma} + \frac{v_B^2}{2g}\right) + h_w$$

$$\left(\begin{smallmatrix}\text{treibende}\\ \text{totale Arbeits-}\\ \text{höhe bei } A\end{smallmatrix}\right) + \text{Gefälle} = \left(\begin{smallmatrix}\text{widerstehende}\\ \text{totale}\\ \text{Arbeitshöhe}\end{smallmatrix}\right) + \begin{smallmatrix}\text{Widerstands-}\\ \text{höhe.}\end{smallmatrix}$$

Digitized by Google

Anmerkung: H die Druckhöhe des Wassers = dem Vertikalabstand des Centrums der Ausflussöffnung vom Oberwasserspiegel;

v die Ausflussgeschwindigkeit = $\sqrt{2gh}$;

g der bekannte Wert 9,8088.

Nun ist $H = \frac{v^2}{2g}$ und daraus $v^2 = 2gH$.

Die vorstehende Arbeitsgleichung wird man bei allen Fällen der Praxis sinngemäss anwenden können.

Bei der hydraulischen Kraftübertragung unterscheiden wir:

1. den Generator, eine natürliche oder künstlich erzeugte Höhendifferenz zwischen zwei oder mehreren Wasserspiegeln;

2. die Wasserleitung, welche diese Wasserspiegel verbindet bezw. das oben abströmende Wasser zwingt, einen bestimmt vorgezeichneten Weg zu fliessen, und

3. die Maschinen (Motoren), welche die Kraft des herabströmenden Wassers in eine andere Kraftform verwandeln.

Über natürliche Wassergefälle ist hier wohl jede beschreibende Bemerkung überflüssig.

Soll die Höhendifferenz der Wasserspiegel künstlich erzeugt werden, so sind Pumpwerke nötig. Man rechnet dabei in den Hubgrenzen bis 150 m Höhe 15 bis 20 % Kraftverlust in den Pumpen und bis 5 % Kraftverlust in den Steigrohren bis zum oberen Wasserspiegel.

Freie Gerinne wollen wir hier ausser Betracht lassen und nur die Druckverluste in den Rohrleitungen eingehender betrachten:

Wasserleitungsröhren werden aus Holz, Thon oder Eisen angefertigt und es ist die Beschaffenheit des Rohmaterials nicht ohne Einfluss auf die Reibungswiderstände; doch sind letztere unabhängig von der Pressung des Wassers im Rohr.

Zur Bestimmung der Gefällverluste in Rohrleitungen bedient man sich jetzt zumeist einer Formel von Levi. Dieselbe lautet:

$$v = k \sqrt{\frac{h_R}{l}}$$

(h_R = Druckhöhenverlust bei einer Länge l in m, bei Röhren vom Halbmesser r des Querschnitts oder d lichter Weite in m).

Bei neuen, gusseisernen Röhren ist:

$$k = 36{,}4 \sqrt{r\,(1 + \sqrt{r})}$$

und bei längere Zeit gebrauchten Röhren wird

$$k = 20{,}5 \sqrt{r\,(1 + 3\sqrt{r})}.$$

Digitized by Google

Tabelle des Wertes k in Levis Formel.

Durchmesser d	Querschnitt $\pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$	$k = 20{,}5 \sqrt{r\,(1 + 3\sqrt{r})}$	Durchmesser d	Querschnitt $\pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4}$	k
0,10	0,007854	5,804	0,42	0,138544	14,45 2
0,108	0,009160	6,191	0,43	0,145220	14,678
0,11	0,009503	6,252	0,44	0,152052	14,903
0,12	0,011309	6,621	0,45	0,159045	15,049
0,13	0,013273	6,929	0,46	0,166190	15,334
0,135	0,014313	7,052	0,47	0,173494	15,559
0,14	0,015393	7,257	0,48	0,180955	15,764
0,15	0,017671	7,564	0,49	0,188574	15,969
0,16	0,020116	7,872	0,50	0,196345	16,195
0,162	0,020612	7,913	0,52	0,213371	16,625
0,17	0,022698	8,159	0,54	0,229021	17,035
0,18	0,025446	8,466	0,55	0,237582	17,240
0,19	0,028352	8,753	0,56	0,246301	17,445
0,20	0,031415	9,040	0,58	0,264208	17,835
0,21	0,034636	9,307	0,60	0,282743	18,245
0,216	0,036643	9,471	0,62	0,301907	18,634
0,22	0,038013	9,594	0,64	0,321699	19,044
0,23	0,041547	9,860	0,65	0,331830	19,331
0,24	0,045238	10,127	0,66	0,342118	19,413
0,25	0,049087	10,399	0,68	0,363168	19,883
0,26	0,053093	10,660	0,70	0,384845	20,192
0,27	0,057255	10,906	0,74	0,430084	20,951
0,28	0,061573	11,193	0,75	0,441786	21,135
0,29	0,066052	11,418	0,76	0,453645	21,320
0,30	0,070685	11,664	0,78	0,477836	21,618
0,31	0,075476	11,910	0,80	0,502654	21,976
0,32	0,080424	12,156	0,82	0,528101	22,427
0,325	0,082957	12,280	0,84	0,554177	22,775
0,33	0,085529	12,382	0,85	0,567450	22,960
0,34	0,090792	12,628	0,86	0,580880	23,144
0,35	0,096211	12,874	0,88	0,608211	23,493
0,36	0,101787	13,099	0,90	0,636172	23,802
0,37	0,107521	13,355	0,92	0,664761	24,210
0,38	0,113411	13,550	0,94	0,693978	24,559
0,39	0,118459	13,796	0,96	0,723823	24,907
0,40	0,125663	14,022	0,98	0,754296	25,256
0,41	0,132025	14,227	1,00	0,785397	25,604

Den Gefällsverlust pro laufenden Meter können wir demnach ansetzen mit

$$\frac{h_R}{l} = \left(\frac{v}{k}\right)^2.$$

Der Druckhöhenverlust steigt im allgemeinen sehr rasch mit der zunehmenden Durchflussgeschwindigkeit v.

Digitized by Google

Prony setzt

$$h_R = (\alpha v + \beta v^2) \frac{l}{d} = (0{,}0000693\, v + 0{,}0013932\, v^2) \frac{l}{d}.$$

Änderungen der Richtung (siehe Fig. 12 bis 15) [Knie], Änderungen der Leitungsquerschnitte (Verengungen, Verbreiterungen u. s. w.) erhöhen die Arbeitsverluste natürlich wesentlich, sodass man innerhalb der Grenzen von 1 bis 30 *km* bei 50 Atmosphären Druck, 200 *mm* Röhrendurchmesser, $v = 0{,}51$ *m* in der Sekunde und $Q = 16$ *l* in der Sekunde weniger als 2,0 % Arbeitsverlust pro 1000 *m* Entfernung wohl nicht erwarten kann.

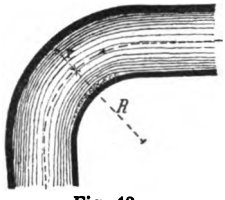


Fig. 12.

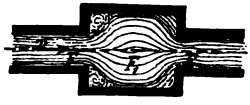


Fig. 13.

Sind bei natürlichen Wasserkräften grosse Wassermengen fortzuleiten, so setzt man $v = {}^3/_4$ bis $2{}^1/_2$, selten bis $3{}^1/_2$ *m* in der Sekunde. Mehr als 2000 *m* Entfernung sind dabei aber wohl noch

Fig. 14.

Fig. 15.

nie überwunden worden. Bei künstlich erzeugtem Wasserdruck ändern sich jedoch die Verhältnisse ganz bedeutend, und es wird bei den hier vorkommenden oft sehr verschiedenen Bedingungen schwer, allgemeine und mit anderen Fällen vergleichbare Ziffern aufzustellen; es sind daher alle diesbezüglichen Berechnungen mit Vorsicht anzuwenden und aufzunehmen.

Nehmen wir an, wir hätten 1000 *m* Rohrlänge von 0,2 *m* lichter Weite und $v = 0{,}5$ *m*, so erhalten wir nach Levis Formel:

$$h_R = \left(\frac{v}{k}\right)^2 l,$$

wenn wir $k = 0{,}904$ ansetzen:

$$h_R = \left(\frac{0{,}5}{0{,}904}\right)^2 1000 = 3{,}07\ m.$$

Digitized by Google

Das giebt nun bei 20 *m* Druckhöhe bezw.

2 Atm. $\frac{3{,}07}{20} = 0{,}154$, d. s. 15,4 % Verlust im totalen Gefälle

5 » $\frac{3{,}07}{50} = 0{,}0614$, » » 6,14 » » » » » »

10 » $\frac{3{,}07}{100} = 0{,}0307$, » » 3,07 » » » » » »

20 » $\frac{3{,}07}{200} = 0{,}0154$, » » 1,54 » » » » » »

50 » $\frac{3{,}07}{500} = 0{,}0062$, » » 0,62 » » » » » »

und das beweist: Je höher der Wasserdruck, desto geringer der Arbeitsverlust.

Leider wird es aber bei hohem Wasserdruck schwer, gewiss aber sehr teuer, die Rohrleitungen genügend sicher und dicht herzustellen.

Nachstehend geben wir darüber einige Ziffern über das derzeit Gebräuchliche und Zulässige auf diesem Gebiete:

Die Wandstärke $= 1{,}48\ Dp + 3$ bei einfacher
$= 1{,}19\ Dp + 3$ bei doppelter } Längsnietung

(D = lichte Weite in *m*, p = Wasserdruck in Atmosphären).

Allgemein gilt:

Rohre von 600 bis 1000 *mm* lichte Weite vertragen 6 bis 10 Atm. Druck

» » 300 » 600 » » » » 10 » 20 » »

» » 150 » 300 » » » » 20 » 40 » »

» » 100 » 150 » » » » 30 » 50 » »

» » 75 *mm* u. weniger » » » 80 » 100 » »

Will man über die hier angegebenen Grenzen hinausgehen, so müssen die Wandstärken schon aussergewöhnlich stark gehalten werden. Mannesmann-Röhren leisten mehr und wird deren Verwendung zu empfehlen sein.

Als Motore verwendet man bei offenem Gerinne Wasserräder bei geschlossenen Röhren jedoch Turbinen oder auch Wassermotore. Letztere werden jetzt in technisch vollkommener Weise und von sehr einfacher Konstruktion ausgeführt; so lange aber ein solcher Motor ca. 15 *cbm* Wasser pro Stunde und Pferdestärke (bei 30 bis 33 *m* Druckhöhe) verbraucht, ist an eine allgemeinere Anwendung nicht zu denken, wenn der Preis des Wassers nicht niedriger wird. Man kann jetzt künstlich gehobenes oder weit hergeleitetes Wasser für industrielle Zwecke kaum billiger als 2.— bis 1,50 ℳ pro P. S. abgeben, und das ist gegenüber der elektrischen Kraft, bei welcher

Digitized by Google

die P. S.-Stunde im Mittel 23 ₰ kostet, viel zu hoch. Von den Wassermotoren (mit Kolben, z. B. Konstruktion Schmidt u. a.) brauchen wir hier also gar nicht weiter zu sprechen. In den Alpenländern liegen diesbezüglich die Verhältnisse natürlich viel günstiger.

Die Wasserkraft am Motor hängt ab von der in der Zeiteinheit zufliessenden Wassermenge (Q in l) und dem Gefälle (H in m) der letzteren. Die verfügbare Wasserkraft (in m/kg)

$$N_d = Q \times H \text{ oder } N_d = \frac{Q \times H}{75} \text{ in P. S.}$$

Ist N_e die effektive Leistung, so ist $\frac{N_e}{N_d} = \eta$.

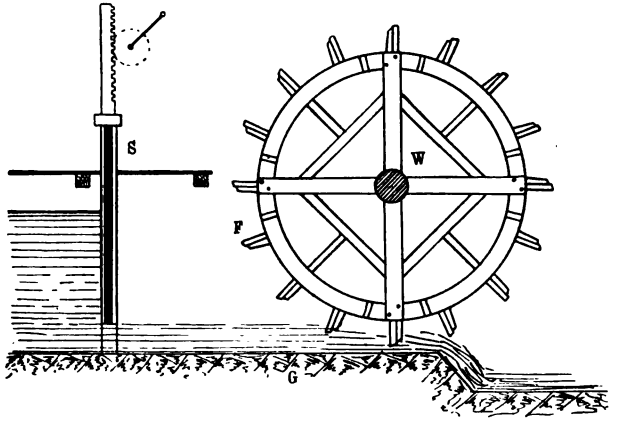


Fig. 16.

Die Wassermenge ist gleich der mittleren Geschwindigkeit in der Wasserleitung mal dem Querschnitt dieser Leitung.

(Sehr einfach und zuverlässig misst man die Wassermenge durch die bei jedem Wasserwerk vorhandene Leerlaufschütze. Diese wird zu diesem Zweck nur so weit aufgezogen, dass das ganze vorhandene Wasser durch die Öffnung derselben unter dem Drucke des vor der Schütze stehenden Wassers fliesst. Man wartet dann so lange, bis sich der Wasserspiegel vor der Schütze nicht weiter hebt oder senkt; sodann wird der Abstand der unteren Schützenkante von der Schützenwelle, die Höhe des Oberwasserspiegels über der Schützenwelle, der Abstand hinter der Schütze vom Oberwasserspiegel vor der Schütze und die lichte Weite der Leerlaufschütze genau gemessen, und kann aus den so ermittelten Ziffern die durchfliessende Wassermenge ziemlich genau berechnet werden.).

Die Geschwindigkeit wird mittels der verbesserten (Harlacher u. a. m.) Woltmann'schen Flügel gemessen.

Wie Querprofile und Gefälle gemessen werden, ist bekannt.

Digitized by Google

Die Wasserbauten umfassen die Stauanlage, den Mühlgraben (den Obergraben) und den Untergraben; in letzterem soll das Wasser mit 0,9 *m*, im Obergraben mit 0,4 bis 0,8 *m* Geschwindigkeit abfliessen.

Ausserdem hat man meistens die Einlaufschütze oder Einlassschütze, den Rechen und hier und da auch mechanische Reinigungsvorrichtungen.

Wasserräder sind sehr langsam laufende Motoren, sie haben aber den grossen Vorteil, dass sie auch bei geringerem Wasserquantum funktionieren und Kraft — wenn auch immer nach der Gleichung $N = Q \times H$ — abgeben, was bei Turbinen nicht immer der Fall ist.

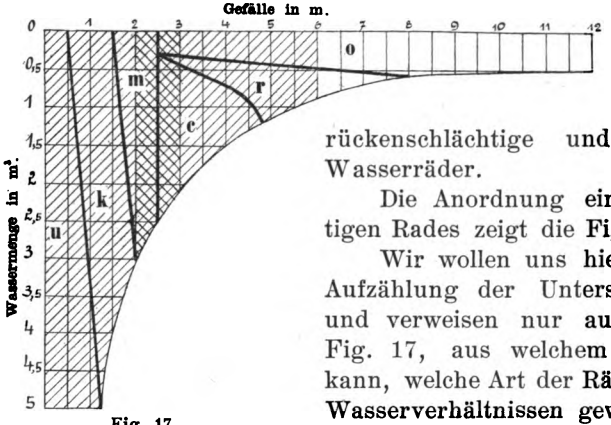


Fig. 17.

Man unterscheidet: unterschlächtige, mittelschlächtige, rückenschlächtige und oberschlächtige Wasserräder.

Die Anordnung eines unterschlächtigen Rades zeigt die Fig. 16. (Seite 25.)

Wir wollen uns hier nicht mit der Aufzählung der Unterschiede aufhalten und verweisen nur auf das Diagramm Fig. 17, aus welchem ersehen werden kann, welche Art der Räder bei gegebenen Wasserverhältnissen gewählt werden soll, und zwar eignen sich

zu *u* unterschlächtige Räder,
zu *k* Kropfräder,
zu *m* mittelschlächtige mit Überlaufschütze,
zu *c* mittelschlächtige mit Koulisseneinlauf,
zu *r* rückenschlächtige und
zu *o* oberschlächtige Räder.

Bei letzteren kann eventuell, wenn das Wasser möglichst spät ausläuft und das Eintauchen in das Unterwasser gänzlich vermieden ist, ein Wirkungsgrad von $\eta = 0{,}85$ erzielt werden; bei 6 bis 12 *m* Gefälle ist η sogar besser als bei Turbinen für gleiches Gefälle, nur sind dann die Anschaffungskosten für diese geringer als für gleichwertige Wasserräder. Bei 3 bis 6 *m* Gefälle können Wasserräder und Turbinen gleichen Wirkungsgrad haben.

Bei sehr variablem Wasserstand sollen die Wasserräder zum Heben und Senken eingerichtet sein. Es giebt eiserne und hölzerne Wasserräder; bei letzteren sei die Welle aus Eichenholz, die übrigen Teile aus Lärchen-, Fichten- oder Kiefernholz.

Digitized by Google

Bei unterschlächtigen Rädern kann man höchstens auf $\eta = 0{,}30$ bis 0,35 rechnen und nur die beste Konstruktion derselben (das sogenannte Poncelet-Rad) ermöglicht, wenn sonst die Bedingungen günstig sind, einen Wirkungsgrad von 0,55, ja sogar 0,65.

Die Schaufeln der unterschlächtigen Räder müssen stets senkrecht aus dem Wasser des Untergrabens austreten.

Alle Wasserräder sind gut auszubalancieren und man muss bei Rädern, die lange nicht gedreht wurden, darauf Rücksicht nehmen, dass der vom Wasser umspülte Teil schwerer ist, als die gleichen trockenen Teile.

Wasserturbinen (es giebt auch Dampfturbinen) sind nicht an jene Wasserverhältnisse gebunden, welche die Grundlagen zum Diagramm Fig. 17 gebildet haben. Wir unterscheiden Turbinen mit vertikalen und solche mit horizontalen Wellen, und wird durch diese die Stellung des Laufrades und des feststehenden Leitrades bestimmt. Wir unterscheiden ferner Radial- und Achsialturbinen, je nach der Richtung, in welcher das Kraftwasser durch die Turbine fliesst; sodann Radial-Turbinen mit innenschlächtiger Beaufschlagung und aussenschlächtiger Beaufschlagung. Bei letzteren ist das Laufrad kleiner als das Leitrad, während bei innenschlächtigen Rädern das Leitrad kleiner als das Laufrad ist, welches das Leitrad eng einschliesst.

Achsialturbinen werden von oben oder von unten beaufschlagt, und fliesst das Wasser in der Richtung der Welle durch die Radschaufeln; bei horizontaler Lagerung der Welle ist die Turbine seitenschlächtig. Achsialturbinen haben wegen der einfacheren Aufstellung bisher mehr Verbreitung als Radialturbinen gefunden, und nur für Hochdruckturbinen eignen sich letztere besser. Neuerer Zeit aber scheint man sich infolge gelungener, vorzüglicher Konstruktionen doch wieder der allgemeineren Verwendung von Radialturbinen zuzuwenden.

Nach dem Grade der Beaufschlagung unterscheidet man Voll- und Partialturbinen und nach der Wirkungsweise des Wassers, Druckturbinen und Überdruckturbinen (auch Aktions- und Reaktionsturbinen genannt).

Der Wirkungsgrad wird bei Aktionsturbinen durch die Beaufschlagung nur wenig beeinflusst, wie aus nachstehenden Ziffern erhellt. In einem bestimmtem Falle war

$\eta = 0{,}75$	bei	voller	Beaufschlagung
$= 0{,}74$	»	90 %	»
$= 0{,}73$	»	80 »	»
$= 0{,}72$	»	70 »	»
$= 0{,}71$	»	60 »	»
$= 0{,}70$	»	50 »	»
$= 0{,}69$	»	40 »	»
$= 0{,}66$	»	30 »	»
$= 0{,}60$	»	20 »	»

Digitized by Google

Dagegen wirken Aktionsturbinen nur gut bei gleichmässigem Wasserzufluss.

Mit Reaktionsturbinen lassen sich bei ähnlichen Wirkungsgraden höhere Tourenzahlen erreichen als mit Aktionsturbinen. Die bekannte Girard-Turbine gehört zu den letzteren, während die nicht minder bekannte Jonval-Turbine zu den Reaktionsturbinen gezählt wird.

Die Jonval-Vollturbine mit nur einem Schaufelkranz und ohne jede Regulierung für Wasserkonsum, höchstens mit Ringschützenregulierung zum Regulieren der Geschwindigkeit versehen, eignet sich für konstante Wassermengen jeder Grösse und ist für solche Verhältnisse entschieden ein guter, billiger und einfacher Motor mit hohem Wirkungsgrade. Ist eine volle Beaufschlagung infolge zeitweilig geringeren Wasserzuflusses nicht möglich, so kann durch Zudecken eines Teiles des Schaufelkranzes die Wasserkraft etwa bis zur Hälfte herab noch mit befriedigendem Wirkungsgrade nutzbar gemacht werden.

Die Jonval-Turbine mit zwei oder mehr Schaufelkränzen eignet sich ganz besonders für Gefälle, welche durch Rückstau variabel werden, während gleichzeitig mit der Verringerung des Gefälles ein meist durch Hochwasser bewirkter vermehrter Wasserzufluss stattfindet. Von diesen Schaufelkränzen ist es zweckmässig, einen für das Minimalwasser und Maximalgefälle zu konstruieren, während die anderen zum Regulieren eingerichtet werden können.

Die Aktionsturbine System Girard ist ebenfalls ein vorzüglicher Motor von hohem Wirkungsgrade; sie verlangt vor allem konstante Gefälle ohne Rückstau, da der Wirkungsgrad derselben abnimmt, sobald sie eintaucht, nützt aber bei konstantem Unterwasserspiegel die variabelsten Wassermengen mit gutem Wirkungsgrade aus.

Ganz besonders sind Girard-Turbinen für sehr hohe konstante Gefälle und geringe, aber sehr variable Wassermengen zu empfehlen und sind für diese Fälle jedem anderen Wassermotor weitaus vorzuziehen.

Nur kurze Zeit andauernder Rückstau schadet bei voll beaufschlagten Girard-Turbinen nur wenig und es kann der Ausfall an Kraft leicht dadurch hereingebracht werden, dass man die Turbine etwas grösser anlegt, um bei Hochwasser und Rückstau noch genügend Kraft zu bekommen, besonders aber indem man sie mit sogenannten Rückschaufeln versieht resp. als Grenzturbinen baut.

Vorzügliche Verwendung finden letztere Motoren als Partial-Girard-Turbinen auf horizontaler Achse für äussere und innere Beaufschlagung konstruiert in der Kleinindustrie.

Kann man das Turbinenrad nicht unmittelbar über den Unterwasserspiegel lagern, so verwendet man Jonval-Turbinen und lagert

Digitized by Google

dann das Laufrad beliebig höher, doch darf die Saughöhe 7 *m* natürlich nicht überschreiten.

Im allgemeinen kann man den Wirkungsgrad der Turbinen mit $\eta = 0{,}75$ ansetzen; das muss jede Turbine (von 1 *m* Durchmesser angefangen) leisten.

Um die Zapfenreibung — ein starker Faktor bei der Berechnung der Kraftverluste — zu verringern, hat die Maschinenfabrik Oerlikon eine elektromagnetische Entlastungsvorrichtung konstruiert, die sich

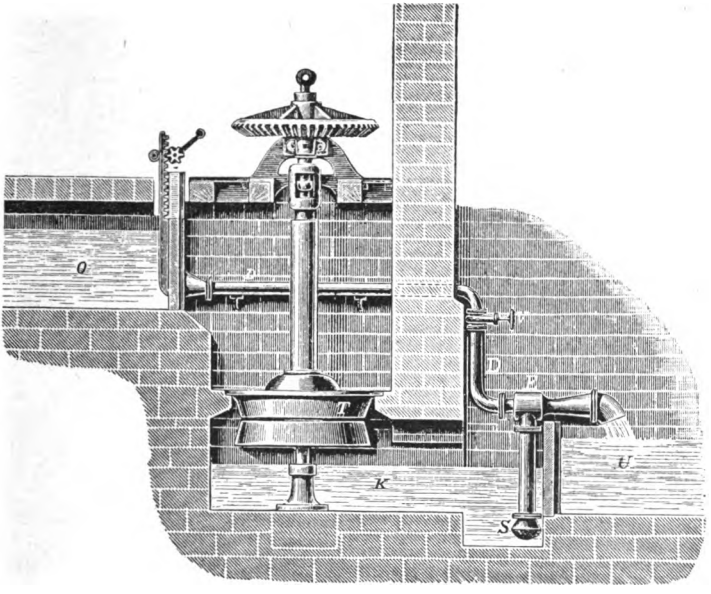


Fig. 18.

bewähren soll. Auch mechanische Entlastungsvorrichtungen sind eventuell zu empfehlen.

Ob es verlässliche Regulatoren für Turbinen giebt?

Die Fabrikanten behaupten: ja — die Abnehmer behaupten: nein; für uns ist diese Frage demnach noch nicht spruchreif.

Die Fig. 18 zeigt die Anordnung einer Turbinenanlage.

10. Beispiel. Wir wollen annehmen, es seien 100 P. S. für ein Pumpenwerk zur Verfügung.

15 bis 20 P. S. gehen im Pumpenwerk,

5 P. S. am Wege in das Hochreservoir verloren,

sodass rund 80 P. S. als übertragbare Energie zur Verfügung bleiben.

In der Rohrleitung sollten 2% Verlust gestattet sein, so bleiben am Motor

$$80 - 0{,}20 \times 80 = 64 \text{ P. S.}$$

Digitized by Google

Der Motor arbeitet mit $\eta = 0{,}75$, also

$$0{,}25 \times 64 = 16 \text{ P. S. und es resultieren}$$
$$64 - 16 = 48 \text{ P. S. oder } 48\,\%$$

der ursprünglich an der Pumpe zur Verfügung stehenden Kraft.

Die Rohre haben dabei 200 *mm* lichte Weite; der Druck beträgt 50 Atmosphären, die Übertragungsentfernung ist 30 *km*, $v = 0{,}51$ *m*, $Q = 16$ *l* pro Sekunde.

Würde man unter sonst gleichen Verhältnissen nur 50 P. S. oder 10 *l* Wasser übertragen, so erhielte die Rohrleitung einen zweimal kleineren Querschnitt oder eine $\sqrt{2} = 1{,}4$ mal kleinere lichte Weite bei gleicher Geschwindigkeit des Wassers. Auch die Wanddicke dieses engeren Rohres würde im Verhältnis $1{,}4 \times 2$ geringer. Das Gewicht des Rohres würde also $\frac{1{,}4}{2} \times \frac{1{,}4}{2} = {}^1/_2$ mal so gross als für 100 P. S., wenn die Wanddicke proportional der lichten Weite abnehmen könnte. Das ist aber nicht der Fall, es muss vielmehr, da die Widerstände mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunehmen, der Querschnitt $\sqrt{1{,}4}$ = ca. 1,2 mal grösser (der Querschnitt $\sqrt{1{,}2} = 1{,}1$ mal) werden, wenn die Widerstände gleich bleiben sollen.

Nun wird das Gewicht des Rohres

$$\overline{1{,}1}^2 \times 0{,}5 = 1{,}21 \times 0{,}5 = 0{,}605 \text{ mal so gross,}$$

als wie für die doppelte Leistung, da aus Herstellungsrücksichten die Wandstärken langsamer abnehmen als die lichten Weiten.

Umgekehrt wachsen Rohr-Gewicht und -Kosten bei doppelter Übertragung nicht im gleichen, sondern in viel geringerem Maasse.

Wir betonen noch einmal, dass der Wirkungsgrad bei hydraulischen Kraftübertragungen rund und ziemlich konstant auf 0,50 bei etwa 30 *km* Übertragungsentfernung angesetzt werden kann.

Dabei partizipieren die einzelnen Verluste an der totalen verlorenen Arbeit in der Weise, dass auf je 1000 *m* Entfernung 3,28 *m* (oder bei 50 Atmosphären Druck 0,65 %) Druckhöhe des Wassers verloren gehen, während die Pumpen einen Verlust von 20 % und der hydraulische Motor einen solchen von 25 % aufweist.

Wir haben nun auch näher zuzusehen, in welchem Verhältnisse sich der Wirkungsgrad ändert, wenn die Druckhöhe des Wassers kleiner wird als 50 Atmosphären.

Nehmen wir an, die Druckhöhe werde von 500 *m* auf 250 *m*, d. h. auf die Hällte reduziert, so wird die erforderliche Wassermenge für dieselbe Kraft 2 mal grösser. Der Querschnitt der Leitung wird ebenfalls 2 mal und der Durchmesser $\sqrt{2} = 1{,}4$ mal grösser. Dadurch werden bei gleicher Geschwindigkeit die Widerstände ca. 1,4 mal kleiner, es bedarf daher, wenn der Druckhöhenverlust durch Reibung derselbe bleiben soll, einen etwas grösseren Geschwindigkeit und es kann ein kleinerer Durchmesser angewendet werden. Gesetzt, wir machten den Durchmesser k mal grösser, so wäre der Querschnitt k^2 mal so gross und müsste demnach die Geschwindigkeit $(1 : k^2)$ mal so gross sein, wenn dieselbe Wassermenge und $(2 : k^2)$ mal so gross, wenn die doppelte

Digitized by Google

Wassermenge durchfliessen sollte. Nun ist sowohl die Reibungshöhe dem Rohrdurchmesser umgekehrt und dem Quadrate der Geschwindigkeit direkt proportional, wenigstens wenn man von der geringen Veränderlichkeit der Erfahrungskoëffizienten absieht, daher nun $(1 : k^2)$ und $(2 : k^2)$ mal so gross wie vorhin, und sollte sie unverändert bleiben, so wäre demnach k zu berechnen aus der Gleichung:

$$\frac{1}{k} \cdot \left(\frac{2}{k^2}\right) = 1.$$

Dieselbe liefert abgerundet $k = \sqrt[5]{4} = \sim 1{,}32$.

Statt 1,4 mal grösser wird also der Durchmesser der Leitung nur $\sim$ 1,32 mal grösser und die Geschwindigkeit des Wassers 1,155 mal grösser bei der doppelten Druckhöhe des Wassers. Das Gewicht der Leitung und deren Kosten (letztere dem ersteren proportional gesetzt) sind nun proportional dem Produkte aus Durchmesser und Wandstärke. Anderseits wächst letztere mit dem Durchmesser und der Pressung, sie wäre daher $1{,}32 \times 0{,}5 = 0{,}66$ mal so gross zu nehmen als bei den engeren Rohren für die höhere Pressung. Damit wäre dann theoretisch das Gewicht $1{,}32 \times 0{,}66 = 0{,}87$ mal so gross als das der ersten Leitung.

Dagegen wird jetzt der Wirkungsgrad bedeutend kleiner, indem bei der halben Druckhöhe die gleich gross gebliebenen Widerstände nun statt 0,65% der ganzen Druckhöhe pro 1000 *m* 1,3% Verlust an Druckhöhe ausmachen.

Haben wir also auch hier 100 P.S. eff. Betriebskraft der Pumpen, so bleiben von denselben im Reservoir wieder 80 P.S. übrig und von diesen 80 P.S. gehen in der 30 *km* langen Leitung $1{,}3 \times 30 = \sim 40\%$ oder $0{,}4 \times 80 = 32$ P.S. verloren, sodass nur noch 80 — 32 oder 48 P. S. aus der Leitung austreten. Im hydraulischen Motor gehen hiervon wieder 25% verloren und es bleiben schliesslich nach der Übertragung $48 - (0{,}25 \times 48) = 36$ P. S. eff. übrig.

Es beträgt also jetzt der Wirkungsgrad der ganzen Anlage (30 *km* Entfernung, $Q = 32\ l$, $h = 250\ m$, $N = 100$ PS, $v = \frac{2}{1{,}32^2} \times 0{,}5 = 0{,}574\ m$, $d = 1{,}32 \times 200 = 264\ mm$) nur noch 36%, d. s. $^2/_3$ derjenigen bei 500 *m* und unter sonst gleichen Umständen. Der Wirkungsgrad ist deshalb bei halb so grosser Druckhöhe um $^1/_3$ kleiner geworden für die nämliche Übertragungsweite.

Wenn das Gefälle ein natürliches ist und daher Pumpen nicht nötig sind, wird der Wirkungsgrad selbstverständlich günstiger.

Durch die 30 *km* lange Leitung gehen 40% verloren und es restieren 60 eff. P.S.; im Motor weiterer Verlust von 25%, sodass schliesslich 25 Nutz-P.S. bleiben, was einem Wirkungsgrad von $\eta = 0{,}45$ entspricht.

Es ist also erwiesen, dass durch Anwendung eines höheren Druckes statt eines niedrigeren der Wirkungsgrad günstiger wird. Im Jahre 1895 wurden demnach auch solche Kraftübertragungen in Manchester fertig gestellt, bei welchen bereits 80 *kg* auf 1 *qcm* pressen. (Engineering 1895, Seite 362.)

Wir wollen aber nunmehr auch untersuchen, wie sich die Verhältnisse gestalten, wenn geringere Drucke — etwa 10 Atmosphären — auf Übertragungen bis 20 *km* angewendet werden.

Digitized by Google

11. Beispiel. 100 P. S. können bei 100 m Druckhöhe $75 \times \eta$ Liter haben, also $75 \times 0{,}8 = 60$ Liter $= 0{,}06$ *cbm*.

Ist $v = 1$ m, so muss der Querschnitt $\frac{0{,}06}{1} = 0{,}06$ qm sein, was einer lichten Weite von ~ 28 *cm* entspricht.

Nun ist der Druckverlust nach Levis Formel:

$$h_R = \left(\frac{v}{k}\right)^2 l = \left(\frac{1}{11{,}193}\right)^2 \times 1000 = 8 \; m,$$

das gesamte Druckgefälle von 100 m wird daher schon in $100 : 8 = 12{,}5$ *km* Entfernung aufgezehrt, und es ist daher eine Übertragung auf 20 *km* unter diesen Verhältnissen gar nicht möglich.

Setzen wir daher $v = 0{,}5$ m, dann wird ein Rohrquerschnitt von 0,12 qm (~ 40 *cm* lichte Weite) erforderlich und es wird

$$v = \frac{0{,}06}{\frac{\pi \times 0{,}4^2}{4}} = \frac{0{,}06}{0{,}12566} = 0{,}4775 \; m$$

und nun wird

$$h_r = \left(\frac{v}{k}\right)^2 l = \left(\frac{0{,}4775}{14{,}023}\right)^2 \times 20000 = 23{,}1 \; m,$$

d. h. $\sim 23\,\%$ und es werden daher von den 80 P. S. im Reservoir $0{,}23 \times 80 = 18{,}4$ P. S. in der Leitung und $(80 - 18{,}4) \times 25 = 15{,}4$ P. S. im Motor absorbiert, sodass $80 - 18{,}4 - 15{,}4 = \sim 46$ P. S. an der Motorwelle zur Verfügung gestellt werden, was einem $\eta = 0{,}46$ entspricht.

Der günstige Einfluss der Rohrweiten auf den Wirkungsgrad ist hiermit recht augenscheinlich erwiesen.

Die Fig. 19 bis 32 zeigen verschiedene Rohrleitungs- und Abzweigungsstücke, nach Normalien, welche vom Verein deutscher Ingenieure und dem deutschen Verein von Gas- und Wasserfachmännern herausgegeben wurden. (Weiteres siehe die »Hütte«.)

Weitere Beispiele:

12. Beispiel. Welche Wandstärke ist nötig, wenn bei einer Rohrleitung $D = \sim 100$ *mm* und $p = 40$ Atm. ist?

Wenn Gusseisen verwendet wird und k pro 1 *qcm* $= 200$ *kg* gesetzt werden darf, so verlangt die Festigkeit bei centrischer Höhlung:

$$\frac{D_1}{D} = \sqrt{\frac{k + 0{,}4\,p}{k - 1{,}3\,p}}; \quad \text{also} \quad \frac{D_1}{100} = \sqrt{\frac{200 + 0{,}4 \times 35}{200 - 1{,}3 \times 35}} = 1{,}213;$$

also: $D_1 = 1{,}213 \times 100 = 121{,}3$ *mm*.

Die Normaltabelle zeigt als nächst höhere Nummer 144 *mm* und es würde der innere Durchmesser

$$D = \frac{D_1}{1{,}213} = \frac{144}{1{,}213} = 118 \; mm$$

und daher die Wandstärke $s = \frac{144 - 118}{2} = 13$ *mm*.

In der Praxis wird man nun folgende Maasse wählen:

$$s = 13 + 4 = 17 \; mm; \quad D_1 = 144 \; mm; \quad D = 110 \; mm.$$

Digitized by Google

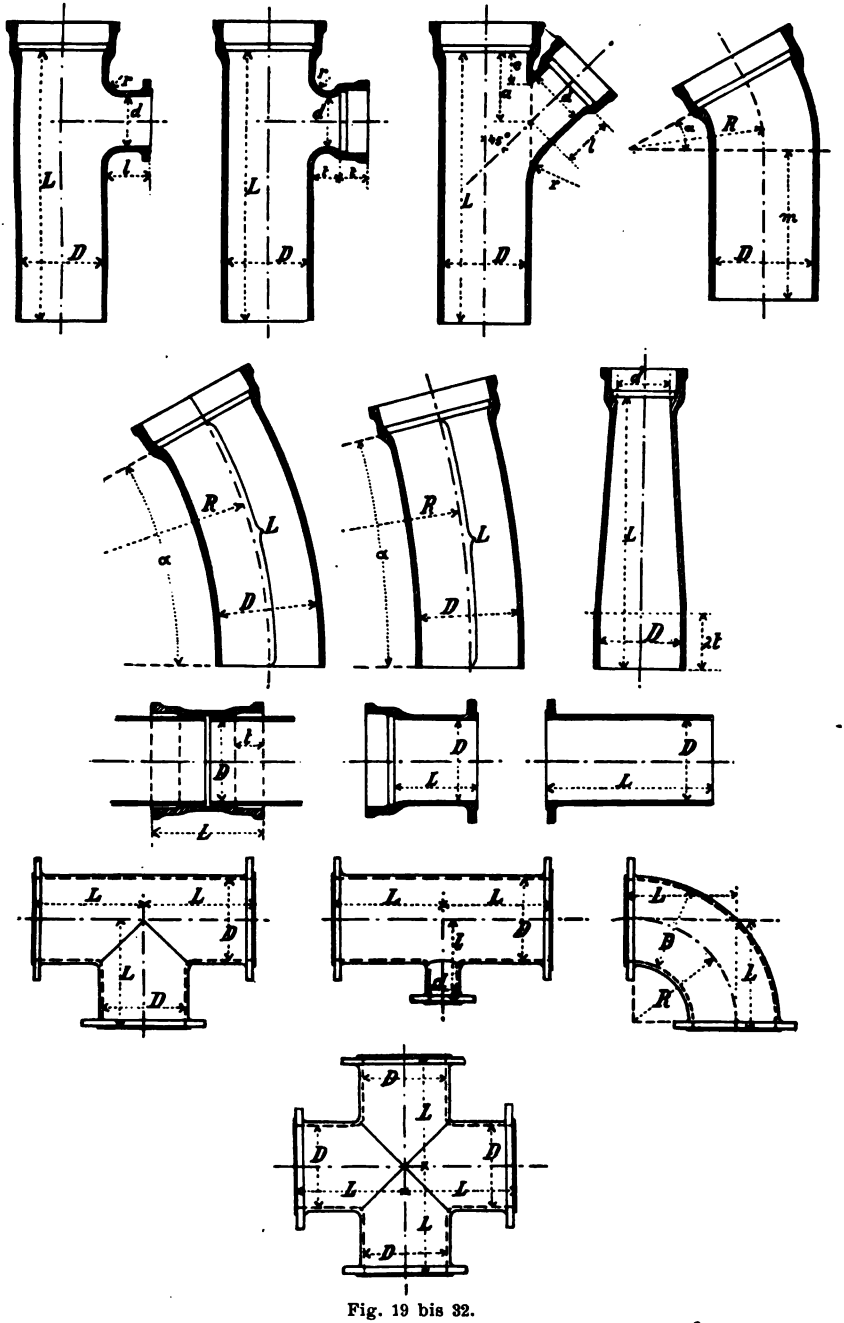


Fig. 19 bis 32.

Digitized by Google

Die Flanschen erhalten dieselben Abmessungen wie die des Normalrohres von 125 *mm* lichte Weite.

13. Beispiel. Welches Gefälle muss eine Rohrleitung von $r = 0{,}50$ *m* und $l = 100$ *m* erhalten, wenn $v = 1$ *m* sein soll?

Nach Levis Formel ist:

$$h_R = \frac{v^2}{k^2} \cdot l = \frac{1^2}{\overline{25{,}6}^2} \times 100 = 0{,}153 \text{ m}.$$

14. Beispiel. Welche Geschwindigkeit nimmt das Wasser in einer Rohrleitung an, deren Durchmesser $d = 0{,}8$ *m* und deren Reibungsgefälle pro 1 *m* Länge $= 0{,}005$ *m*?

Nach Levi ist in diesem Falle $k = 21{,}976$ und

$$v = 21.976 \sqrt{\frac{h_R}{l}} = 21{,}976 \sqrt{\frac{0{,}005}{1}} = 1{,}55 \text{ m}.$$

15. Beispiel. Die Leitung hat $l = 1000$; lichte Weite $d = 200$ *mm*.

Wie gross ist der Druckverlust bei $\left\{\begin{matrix} v = 1\ m \\ v = 2\ m \end{matrix}\right\}$?

bei $v = 1$ *m*: $\quad h_R = \left(\frac{v}{k}\right)^2 l = \left(\frac{1}{9{,}04}\right)^2 \times 1000 = 12{,}3$ *m*,

bei $v = 2$ *m*: $\quad h_R = \left(\frac{2}{9{,}04}\right)^2 \times 1000 = 49{,}2$ *m*.

16. Beispiel. Durch eine Rohrleitung soll eine Turbinenanlage gespeist werden. Die ganze Länge der Leitung beträgt 1000 *m* und das vorhandene Gefälle 7,5 *m*. Davon soll möglichst wenig verloren gehen. Welchen Durchmesser muss die Leitung erhalten, wenn dieselbe 2 *cbm* Wasser in der Sekunde der Turbine zuführen soll, und welcher Teil des Gefälles geht dann durch die Reibung verloren?

Die gewöhnliche mittlere Geschwindigkeit des Wassers in Rohrleitungen für hydraulische Motoren ist 1 *m*. Da nun in unserem Falle der Gefällverlust möglichst klein ausfallen soll, so kann man diese Geschwindigkeit nicht so gross, vielleicht nur $= 0{,}6$ *m* in der Sekunde, annehmen.

Für diese Geschwindigkeit würde aber der Querschnitt der Rohrleitung:

$$F = \frac{2}{0{,}6} = 3{,}333 \text{ qm} \quad \text{oder der Durchmesser } d = 2{,}06 \text{ m}.$$

Ist dies nicht ausführbar, so nehme man zwei Leitungen vom halben Querschnitte $f = 1{,}667$ *qm* oder $d = 1{,}46$ *m* Durchmesser.

Für diesen grossen Durchmesser wird der Koëffizient β berechnet.

Es wird sonach:

$$\beta = 2\left(0{,}000507 + \frac{0{,}00000647}{0{,}73}\right) = 2 \times 0{,}000516 = 0{,}001032.$$

Der Gefällverlust ergiebt sich dann nach der Formel:

$$h_R = \frac{\beta}{r} \cdot v^2 l = \frac{0{,}001032}{0{,}73} \times 0{,}6^2 \times 1000 = 0{,}508 = \sim 0{,}5 \text{ m}$$

und bleibt demnach als nutzbares, auf die Turbinen wirkendes Gefälle $7{,}5 - 0{,}5 = 7$ *m* übrig.

17. Beispiel. Zwei Reservoire sind durch eine 20 *m* lange Röhrenleitung von 0,06 *m* lichter Weite verbunden. Wasserspiegeldifferenz $= 8$ *m*. Die Rohrleitung erweitert sich an den Eintrittsstellen allmählich, sodass die Übergangswiderstände vernachlässigt werden können.

Digitized by Google

Mit welcher Geschwindigkeit wird das Wasser durch die Röhrenleitung getrieben und welche Wassermenge liefert dieselbe in einer Stunde?

Die Niveaudifferenz hat nur die Reibung in den Rohren zu überwinden. Wir erhalten vorerst:

$$8 = (0{,}0000693\ v + 0{,}0013932\ v^2)\ \frac{20{,}0}{0{,}06}$$

oder $$\frac{8 \times 0{,}06}{20{,}0} = 0{,}0000693\ v + 0{,}0013932\ v^2$$

oder $$v^2 + \frac{0{,}0000693}{0{,}0013932}\ v = \frac{8 \times 0{,}06}{20{,}0 \times 0{,}0013932}$$

und $$v^2 + 0{,}04975\ v = 1{,}722,$$

demnach $$v = -\frac{0{,}04975}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0{,}04975}{2}\right)^2 + 1{,}722}$$

$$v = 1{,}287\ m,$$

weil wir natürlich nur das positive Vorzeichen berücksichtigen können.

Der Querschnitt der Rohrleitung ist:

$$\frac{\pi \times \overline{0{,}06}^2}{4} = 0{,}002827\ qm,$$

daher fliessen in der Sekunde

$$0{,}002827 \times 1{,}287 = 0{,}00364\ cbm$$

oder $$0{,}00364 \times 3600 = 13{,}2\ cbm$$ in der Stunde.

Noch besser passt aber hier eine bekannte Formel von Weisbach:

$$h_R = \left(0{,}01439 + \frac{0{,}0094711}{\sqrt{v}}\right) \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}.$$

Dieselbe giebt den Gefällsverlust als Teil der Geschwindigkeitshöhe $\frac{v^2}{2g}$, gestattet aber die genauere Ermittelung der Durchflussgeschwindigkeit v bei gegebenem Reibungsgefälle nur durch probierendes Rechnen, indem man bei der Berechnung des ersten Näherungswertes von v für den sogenannten von v noch im geringeren Maasse abhängigen Reibungskoëffizienten $\left(0{,}01439 + \frac{0{,}0094711}{\sqrt{v}}\right)$ den Mittelwert 0,018 einsetzt. Das genügt, wenn es nicht auf wissenschaftliche Genauigkeit ankommt. Wir setzen nun an:

$$8 = 0{,}018 \times \frac{20{,}0}{0{,}06} \times \frac{v^2}{2 \times 9{,}81};$$

zu

$$v = \sqrt{\frac{8 \times 0{,}06 \times 2 \times 9{,}81}{0{,}018 \times 20{,}0}} = 1{,}615\ m.$$

Dagegen erhalten wir nach der oberen genaueren Formel:

$$8 = \left(0{,}01439 + \frac{0{,}0094711}{\sqrt{1{,}615}}\right) \times \frac{20{,}0}{0{,}06} \times \frac{v^2}{2g}$$

und $$\frac{v^2}{2g} = \frac{8 \times 0{,}06}{20{,}0\left(0{,}01439 + \frac{0{,}0094711}{\sqrt{1{,}615}}\right)} = \frac{8 \times 0{,}06}{20{,}0 \times 0{,}02187} = 0{,}1096$$

und schliesslich $$v = 1{,}465\ m.$$

Digitized by Google

Die pneumatische Kraftübertragung.

Trotz der vielen Misserfolge, die bis jetzt zu verzeichnen sind, tritt immer wieder die Idee in den Vordergrund, Kräfte mittels Druckluft auf grosse Entfernungen zu übertragen oder Kräfte auf diese Weise über grössere Gebiete zu verteilen. Warum solche Versuche missglückten und warum auch künftig anzustellende Versuche wenig Aussicht auf Erfolg haben, ist leicht einzusehen, wenn man bedenkt, dass eine einzige undichte Stelle enorme Kraftverluste veranlasst und den Gesamtbetrieb in Frage stellen kann.

Wie schwer es aber ist, derart komplizierte Anlagen in allen ihren Details und besonders im Rohrleitungsnetz vollkommen luftdicht herzustellen und zu erhalten, wird auch jener leicht begreifen, der sich mit solchen Versuchen noch nicht vergeblich abgemüht hat.

Wegen der bestehenden Anlagen wollen wir hier über diese Art der Kraftübertragung einige Erläuterungen einfügen; es dürften aber in Hinkunft weitere Versuche nur sehr spärlich angestellt werden; denn nur bei besonderen Einrichtungen (pneumatische Post, Kanalisations-Anlagen u. s. w.) wird dieselbe einige Vorteile bieten.

Zur pneumatischen Kraftübertragung braucht man:

1. Kompressoren und die zu deren Betriebe nötigen Kraftmaschinen;

2. die Luftbehälter und Rohrleitungen, und

3. Maschinen und Apparate (Motoren), welche die so übertragene Energie in eine der üblichen Nutzformen der Kraft umgestalten.

Kompressoren. Wir unterscheiden trockene, halbnasse und nasse Kompressoren. Welchen davon der Vorzug zu geben ist, dürfte schwer prompt zu beantworten sein; alle diese Konstruktionen bieten Vorteile und Nachteile, und zwar:

Trockene Kompressoren haben kleinere Cylinder und geringeres Gewicht; sie gestatten eine grössere Kolbengeschwindigkeit; da die verwendete Luft wenig Feuchtigkeit enthält, ist Eisbildung in den Rohren und Motoren nicht zu fürchten; auch die Herstellung ist billiger als die der nassen Kompressoren. Dagegen ist die starke

Digitized by Google

Erwärmung der Luft kein Vorteil. Trockene Kompressoren brauchen auch mehr Kraft, mehr Schmiermaterial und unterliegen einer grösseren Abnutzung.

Halbnasse Kompressoren brauchen weniger Kraft, haben einen kleineren schädlichen Raum und einen grösseren volumetrischen Wirkungsgrad; nicht zu vergessen, dass sich die Luft während der Kompression abkühlt. Der geringere Kraftverbrauch gleicht sich aber aus, weil die dazu nötigen Kühlwasser-Druckpumpen sogar ein Mehr an Kraft erfordern; sie verschmutzen leicht und es bildet sich Rost, eventuell auch Eis; die Einspritzvorrichtungen brauchen viel Reparatur, der Wasserbedarf ist nicht unbedeutend, die Herstellungskosten sind daher höher als die der trockenen Kompressoren.

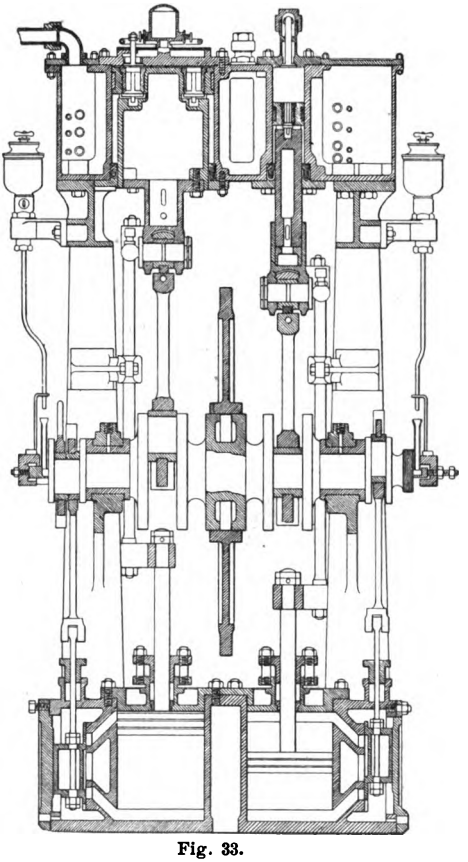


Fig. 33.

Bei den nassen Kompressoren wird die Luft während der Kompression auch abgekühlt, der Kraftbedarf beim Komprimieren ist daher gering; die Konstruktion ist einfach, der schädliche Raum klein, der volumetrische Wirkungsgrad gross. Dagegen gestatten sie nur eine geringe Kolbengeschwindigkeit; sie müssen einen grösseren Cylinder haben, erhalten grösseres Gewicht und brauchen mehr Raum als die anderen Konstruktionen; sie benötigen noch mehr Kühlwasser und ziemlich viel Kraft zur Wasserzuführung. Die feuchte Luft veranlasst Rostbildung und nicht selten bedeutendes Verschmutzen der Bestandteile.

Mit solchen Kompressoren erreicht man eine siebenfache Verdichtung der Luft und das genügt für die meisten praktischen Fälle.

Digitized by Google

Braucht man bedeutendere Luftverdichtung, so sind stufenweise wirkende sogenannte Verbundkompressoren anzuwenden, wie solche von Elwel Fils in Paris ([Fig. 33, Seite 37] Dinglers polytechnisches Journal 1895) und sodann von unserem auf diesem Gebiete (aber nicht nur auf diesem, sondern auch auf vielen anderen Gebieten) bestens bekannten Professor Riedler (Berlin-Charlottenburg) konstruiert worden sind. (Z. d. V. d. Ing. 1891.)

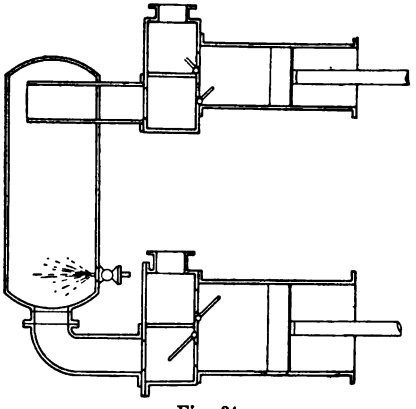


Fig. 34.

Diese Verbundkompressoren (Fig. 34 zeigt das Konstruktionsprinzip) arbeiten mit grossem volumetrischem Wirkungsgrad, brauchen wenig Kraft und verursachen geringere Betriebskosten als die übrigen Systeme. Allerdings brauchen sie viel Schmiermaterial, verursachen unter Umständen viele Reparaturarbeiten und nicht geringe Herstellungskosten.

Die bis jetzt erreichten Maximalresultate gehen dahin, dass eine Dampfpferdekraft in der Stunde 10,4 *cbm* Luft bei einem Enddruck von 6 Atmosphären ansaugt; das ist aber nur mit Riedlers Kompressor möglich, alle anderen Konstruktionen leisten weniger.

Riedler-Kompressor.

(Centralstation Rue St. Fargeau, Paris.)

Kompressor	Umdrehungen in der Minute	Indicierte Kompressorarbeit	Kompressordruck	Volum-Wirkungsgrad	Luftlieferung		
					wirkliches Saugvolumen für 1 Umdrehung *cbm*	stündlich *cbm*	1 Dampfpferdekraft und Stunde *cbm*
Riedler.	52	615	6,0	0,985	2,195	6848	10,020
Cylinder-Durchmesser:	60	709	6,0	0,98	2,18	7902	10,026
1090 *mm* bezw. 670 *mm*,	38	422	6,0	0,985	2,195	5000	10,656
Hub: 1200 *mm*.	39	424	6,0	0,985	2,195	5136	10,890

Ein Kompressor System Elwel Fils, der stündlich 500 *l* Druckluft von 100 Atmosphären Spannung liefert, hat folgende (siehe Revue industrielle 1894) Hauptabmessungen:

Digitized by Google

Durchmesser des grossen Kompressorkolbens	185 *mm*
» » zugehörigen Trunkkolbens	160 »
» » kleinen Kompressorkolbens	58,5 »
» » zugehörigen Trunkkolbens	48,4 »
» der Dampfkolben	165 »
Anzahl der minutlichen Umdrehungen	300 bis 350
Dampfspannung	3 bis 5 Atm.
Durchmesser des Plungers der Pumpe für Kühlwasser .	40 *mm*
Hub » » » » » » .	70 »
Durchmesser des Dampf-Einströmrohres	50 »
» » Dampf-Ausströmrohres	60 »

Die Hauptvorteile dieses Systems sind:

1. Durch die anfängliche Erzeugung von Druckluft mit niederer Spannung werden Verluste infolge der schädlichen Räume äusserst gering ausfallen.

2. Die in vier Phasen erfolgende Kompression der Luft gestattet dieser, sich zwischen den beiden Cylindern gehörig abzukühlen.

3. Die beiden letzten Phasen der Kompression gehen in einem verhältnismässig kleinen Cylinder vor sich, dessen Kolben leicht dicht zu halten ist.

4. Die ganze Maschine kann leicht auseinander genommen und in sehr kurzer Zeit wieder zusammengesetzt werden.

Die Rohrleitungen bei der pneumatischen Kraftübertragung. Bevor man die gepresste Luft in die Leitung eintreten lässt, hat sie gewöhnlich einen Luftsammelraum (Reservoir) zu passieren, der zugleich als Regulator dienen kann. Man hat übrigens auch besondere Druck- und Leistungsregulatoren konstruiert, die in jeder beliebigen Stelle der Luftleitung angebracht werden können. Die Röhren werden aus Schmiedeeisen, Gusseisen, Blei, Kautschuk u. s. w. angefertigt. Am geeignetsten für sehr lange Leitungen sind natürlich solche aus Gusseisen, die bis zu 150 *mm* lichte Weite zu diesen Zwecken Verwendung finden.

Kraftverluste sind in der Leitung veranlasst: 1. durch Undichtigkeiten und 2. infolge des Widerstandes der Leitung.

Die Kraftverluste infolge Undichtigkeiten zu ermitteln, ist eine schwierige Sache und formelmässig kann man dieses Thema gar nicht behandeln, weil die bestimmenden Faktoren allzu variable und im einzelnen nicht ermittelbar sind. Die nachstehende Tabelle zeigt Messresultate, die Prof. Riedler und Prof. Gutermuth an dem Netze der Pariser Druckluftanlage gefunden haben, und wenn auch keine allgemeinen Schlüsse aus derselben gezogen werden können, gestattet sie doch die Annahme, dass unter Umständen das verhältnismässige Dichthalten einer Leitung nicht gerade unmöglich ist.

Digitized by Google

Versuchsresultate
bei Untersuchungen über die Dichtheit der Pariser Druckluftanlage.

No.	Untersuchte Strecken	Länge	Pressung in der Leitung		Spannungsabfall		Luftverlust in *cbm*		Bemerkungen
			am Anfang des Versuches	am Ende des Versuches	während des Versuches	in einer Stunde	in einer Stunde	in Prozent der Lufterzeugung	
		in *m*	Atm.	Atm.	Atm.	Atm.			
I.	Südl. Leitung. Usine — Place de la Concorde	9142	6,5	6,0	0,5	1,5	970	3	Während der Versuche I, II und IV bestanden bedeutende Undichtheiten in St. Fargeau und in der Rue de Belleville.
II.	Ganze städt. Leitung . .	17160	6,9	5,9	1,0	1,5	1900	6,3	Bei den Versuchen II sowie IV ist der grössere Verlust durch den Luftverbrauch der pneumatischen Uhren und der sonstigen, nicht abgestellten Betriebe bedingt.
III.	Usine — Place de la Concorde	9142	7,0	6,43	0,57	0,75	368	2,16	
IV.	Ganze städt. Leitung . .	17160	7,0	5,82	0,88	1,32	1669	5,5	II und IV einschliesslich Abzweigungen.
V.	Nördl. Leitung Usine — Rue de Belleville	1440	6,0	5,0	1,0	0,6	59,4	2,3	Als Lufterzeugung sind gleichmässig 30000 *cbm* p. Stunde angenommen.
VI.	Usine — Rue des Pyrénées.	550	6,1	3,7	2,4	0,56	22,15	2,2	In allen Fällen ist der Luftverlust in Prozenten der Lufterzeugung auf die ganze Leitungslänge bezogen.

Die Druckluftanlage in Offenbach a. M. ist täglich von 11 Uhr nachts bis 6 Uhr früh ausser Betrieb und war es daher dem Prof. Gutermuth möglich, regelmässige Beobachtungen und Messungen anstellen zu können; er kam zu folgenden Resultaten: Für 8 *km* Leitungslänge und bei einem Leitungsinhalt von 189,2 *cbm* beträgt der Luftverlust in der Stunde 1,5% des Leitungsinhaltes (0,6 Atm. in 6 Stunden) oder auf 4000 *cbm* Luftlieferung pro Stunde $^1/_2$ pro Mille für 1 *km* Leitungslänge (gegen 25% der Pariser Leitung).

Das gilt ohne Hausanschlüsse, sind diese geöffnet, wird der Verlust natürlich viel höher, da die meisten Undichtigkeiten bei den Hähnen zu beklagen sind.

So liegen die Verhältnisse in Paris und Offenbach; es darf daraus nicht geschlossen werden, dass das so bleibt und dass anderswo diese Ziffern ohne weiteres Geltung haben; die Dichtigkeit einer Rohrleitung ist ganz gewiss eine sehr unsichere und variable Sache.

Die beiden obengenannten Professoren haben eine Formel mittels vielfacher und eingehender Versuche ermittelt, welche als wohl geeignet

Digitized by Google

bezeichnet werden kann, den ungefähren Druckverlust zwischen zwei Punkten der Leitung rechnungsmässig zu bestimmen.

Bezeichnet γ das mittlere Gewicht von 1 *cbm* Luft, l die Länge des betreffenden Leitungsstückes in *m*, d den Durchmesser des Leitungsquerschnittes in *m*, u die mittlere Luftgeschwindigkeit in *m* pro Sekunde, Q das sekundliche Volumen der Luft, gemessen bei der mittleren Spannung und Temperatur in der Leitung in *cbm*, dann kann der Druckverlust z berechnet werden nach:

$$z = \frac{533}{10^{10}} \gamma \frac{l}{d} u^2 = \frac{864}{10^{10}} \gamma l \frac{Q^2}{d^5} \text{ in } kg \text{ pro } qcm.$$

Die Wirkungsgrade von Luftdruckanlagen zu berechnen, ist eine kaum zu lösende Aufgabe und selbst die allgemeinste Grundformel

$$\eta = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{Aufgewendete Arbeit}}$$

ist bei der Schwierigkeit, die hierbei geltenden Grenzwerte zu bestimmen, nur mit zweifelhaftem Erfolg anzuwenden. Die vorstehende Formel setzt voraus, dass alle Angaben auf mittlere Spannung und mittlere Temperatur reduziert werden. Bezüglich der Spannung ist das möglich, wenn auch zeitraubend und nicht gerade einfach; die mittlere Temperatur aber zu bestimmen, ist schon zu viel verlangt und bei grossen Leitungslängen eine Arbeit, an die ein gewissenhafter Rechner nur mit Widerwillen denken kann. Die Schwierigkeiten, Wirkungsgrade der Kompressoren zu bestimmen, sind ebenfalls bedeutend und nur für Theoretiker als Kabinettsarbeiten verlockend.

Die Regnault'sche Zahl[1]) (für feuchte Luft R = 29,38 *m/kg*) hat für den Praktiker wenig Wert, so sehr wir dieselbe auch bei theoretischen Arbeiten hochschätzen. Dazu kommt, dass wir zwischen volumetrischem und dynamischem Wirkungsgrad unterscheiden müssen; ersterer bezeichnet uns das Verhältnis der theoretisch berechneten zur thatsächlich zur Kompression gelangenden Luftmenge, während der dynamische Wirkungsgrad das Verhältnis der zur Kompression und Verdrängung der Luft notwendigen Arbeit zur gesamten im Primärmotor geleisteten Arbeit bezeichnet.

Bedenkt man nun, dass jede Erwärmung der Luft bei der Kompression (und die ist nicht zu vermeiden) einen Verlust an Energie bedeutet, der theoretisch ohne Schwierigkeit, in der Praxis aber wohl kaum bestimmbar ist; dass ferner das Verdrängen und die Cirkulation der Luft und des Kühlwassers, der Widerstand in den Klappen und Ventilen, der Widerstand beim Ansaugen der Luft, der Reibungswiderstand am Kolben, in den Stopfbüchsen, Schiebern und Ventilen,

[1]) *R* bedeutet die Arbeit, welche 1 *kg* Luft bei der Ausdehnung infolge Erwärmung verrichtet, wenn konstanter Druck vorausgesetzt wird.

Digitized by Google

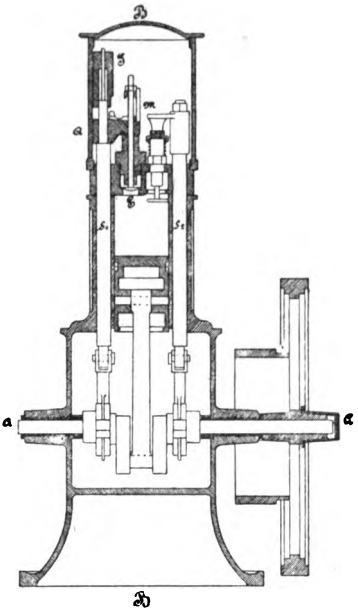


Fig. 35.

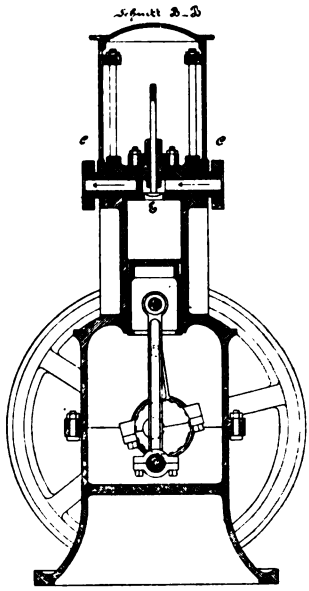


Fig. 36.

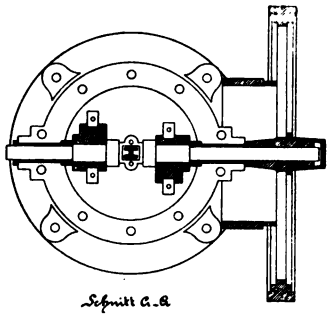


Fig. 37.

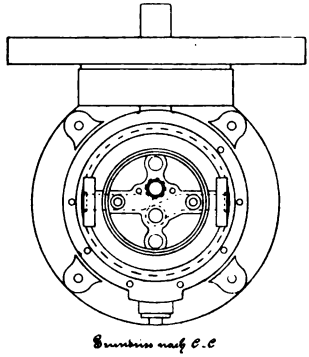


Fig. 38.

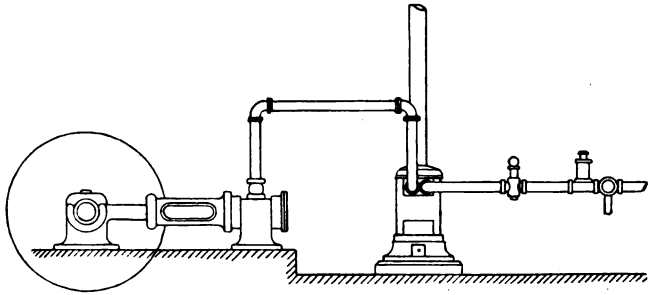


Fig. 39.

Digitized by Google

der Widerstand in den Lagern der Pleuelstangen und Schwungradachsen und die äusseren und inneren Luftwiderstände schon unter normalen Verhältnissen, besonders aber bei Unregelmässigkeiten Kraftverluste veranlassen, so wird jeder Praktiker einsehen, dass an eine genaue Ermittelung dieser Verluste nicht zu denken ist und dass die bezüglichen Regeln und Erfahrungszahlen wohl auch hier wertvolle Behelfe für Modellkonstruktionen bilden, aber nur wenig Anhaltspunkte für die Beurteilung der Wirkungsgrade bei praktischen Betrieben bieten.

Die Luftmotore sind zumeist einfach oder doppelt wirkende Kurbelmaschinen oder auch direkt wirkende Arbeitsmaschinen. Zu letzteren gehören z. B. die beim Tunnelbau verwendeten Bohrmeissel und Gestein-, Stoss- und Bohrmaschinen.

Die Kurbelmaschinen wirken ähnlich wie Dampfkolbenmaschinen und sind auch ähnlich gebaut, nur ist beim Betrieb derselben zu beachten, dass die Druckluft vor Eintritt in die Cylinder erwärmt werden muss, um Eisbildung zu vermeiden und solche Motore nur dann rationell und mit gutem Wirkungsgrad arbeiten, wenn die Pressluft bis nahezu auf die atmosphärische Spannung expandieren kann. Die meisten einfachen Dampfmaschinen eignen sich auch zum Betrieb mit Druckluft.

Die Fig. 35 bis 38 zeigen einen Luftmotor, wie er s. Z. in der Fabrik der Firma Riedinger & Co. in Augsburg gebaut wurde; nachstehende Tabelle giebt einige Maasse dazu:

Leistung in P.S.		¾	1	2	4
Cylinderdurchmesser	*mm*	80	100	125	180
Hub	»	120	120	150	180
Minutliche Umdrehungen		250	250	250	200
Gesamthöhe	*mm*	1000	1000	1100	1500
Durchmesser der Grundfläche	»	450	450	450	550
» des Schwungrades	»	540	540	600	800

Die Fig. 39 zeigt die Anordnung eines ähnlichen Luftmotors und zwar in horizontaler Lage mit Luftvorwärmung, die übrigens in einem gewöhnlichen Zimmerheizofen besorgt werden kann. Wie bei allen Druckluftanlagen, ist auch hier für Entwässerungsanlagen reichlich vorzusorgen.

Das Vorstehende genügt wohl, um nachzuweisen, welche Schwierigkeiten erwachsen würden, wenn man den ungefähren Wirkungsgrad eines derartigen Motors ermitteln müsste; die Bestimmung der konstanten Leistungen eines solchen unterliegt aber natürlich keinem Anstande und wird dabei wie bei den Messungen der Dampfmaschinen vorgegangen.

Digitized by Google

Die nachstehende Tabelle giebt diesbezüglich einige recht gut verwendbare Anhaltspunkte:

Versuchsergebnisse mit Ventil- und Schieberluftmotoren.

Versuch	Luftpressung vor der Maschine Atm.	Mittlere Lufttemperatur beim Eintritt °C.	Mittlere Lufttemperatur beim Austritt °C.	Leistung in $P.S._e$	Leistung in $P.S._i$	Minutliche Umdrehung	Luftverbrauch für 1 $P.S._e$ Stunde *cbm*	Luftverbrauch mechanischer Wirkungsgrad	Bemerkungen
1pferdiger einfachwirkender Ventilmotor.									
I	6,0	192	10	1,31	1,40	238	17,1	0,94	Aus Versuchen von Schröter u. Gutermuth. Regelmässiges Funktionieren des Einlassventils.
2pferdiger einfachwirkender Ventilmotor.									
II	6,0	260	35	2,38	—	221	17,4	—	Desgl. 15 Unterbrechungen des Einlassventils.
III	6,0	216	41	1,89	—	228	18,2	—	Desgl. 45 Unterbrechungen des Einlassventils.
IV	6,0	192	35	1,86	2,19	216	14,3	0,85	Auslassregulierung.
4pferdiger einfachwirkender Ventilmotor.									
V	7,5	188	21	5,15	—	209	15,4	—	Einlassregulierung.
5pferdiger doppeltwirkender Schiebermotor.									
VI	7,0	197	17	7,45	9,40	179,5	18,5	0,79	Aus Versuchen von Schröter und Gutermuth.
VII	7,0	23	49	6,56	8,68	158,1	20,0	0,76	Desgl. (Kalte Luft.)

18. Beispiel. Mit Bezug auf obige Formel über die Druckverluste sind diese zu berechnen, wenn $u = 6{,}5\ m$, $d = 0{,}300\ m$, $l = 16500\ m$; dann wird $z = \sim 0{,}05\ kg$ pro *qcm* für je 1000 *m* Länge, also

$$16{,}5 \times 0{,}05 = 0{,}825 \text{ Atmosphären.}$$

Nun muss man aber noch die Druckverluste in den Entwässerungsapparaten und Absperrschiebern zuzählen, und können dieselben wohl bei $u = 5{,}58$ bis 8,70 mit 0,14 bis 0,34 Atm. angesetzt werden.

19. Beispiel. Der Druck von 1,200 *cbm* Luft soll von 750 *mm* auf 800 *mm* Quecksilberhöhe gebracht werden. Welche Arbeit ist erforderlich?

Der Atmosphärendruck ist hier $0{,}750 \times 13600 = 10200\ kg$ pro *qm*. Die gesuchte Arbeit ist demnach:

$$Nu = 3{,}44\, v\, p \left[\left(\frac{p_2}{p}\right)^{0{,}2907} - 1\right] = 3{,}44 \times 1{,}200 \times 10200 \times \left[\left(\frac{800}{750}\right)^{0{,}2907} - 1\right].$$

Um die Klammer aufzulösen, ist zunächst:

$$\left(\frac{800}{750}\right)^{0{,}2907} = \text{Num. log } 0{,}2907\ [\log 800 - \log 750] = \text{Num. log } 0{,}00813 = 1{,}018.$$

Nach Abzug von 1 ist obiger Klammerwert gleich 0,018.

Es ist also:

$$Nu = 3{,}44 \times 1{,}200 \times 10200 \times 0{,}018 = 75{,}8\ m|kg.$$

20. Beispiel. Ein doppelt wirkender Kompressionscylinder hat 450 *mm* Durchmesser (*d*) und 600 *mm* Hub. Der Kolben macht 30 Doppelhube in der

Digitized by Google

Minute. Die Luft wird auf 7 Atmosphären Überdruck komprimiert. Wie gross ist das Volumen der angesaugten Luft; wie gross dasjenige der komprimierten Luft, und welche Kraft erfordert der Kompressor pro Sekunde und welche in P. S. wenn man von den Nebenhindernissen absieht und den schädlichen Raum im Cylinder vernachlässigt?

Es ist zunächst die Kolbengeschwindigkeit pro Sekunde bei 30 Doppelhuben pro Minute:

$$v = \frac{2 \times 30 \times 0{,}600}{60} = 0{,}600\ m.$$

Der Querschnitt des Kolbens ist $0{,}7854\ d^2 = 0{,}1590\ qm$.

Es ist also das angesaugte Luftvolumen pro Sekunde theoretisch:

$$V = 0{,}1590 \times 0{,}600 = 0{,}0954\ cbm.$$

Das Gewicht dieses Volumens ist $= 1{,}293 \times 0{,}0954 = 0{,}1233\ kg$.

Das Volumen der auf 8 Atmosphären absolute Spannung komprimierten Luft ist achtmal kleiner oder deren Druck achtmal grösser; das Gewicht bleibt natürlich dasselbe. Dieses Volumen ist also:

$$V_2 = \frac{0{,}0954}{8} = 0{,}012\ cbm \text{ pro Sekunde.}$$

Die erforderliche Betriebskraft müsste also gleich sein:

$$Nu = vp \log \text{nat.} \frac{p^2}{p} = 0{,}0954 \times 10333 \log \text{nat.} \frac{8}{1} = 2035\ m/kg$$

und das sind

$$\frac{2035}{75} = 27 \text{ P.S.}$$

21. Beispiel. Es sollen pro Sekunde 1,200 *cbm* Luft auf 12 Atm. absolute Spannung komprimiert werden. Welche Dimensionen erhält der Kompressor, wenn derselbe mit zwei Cylindern angeordnet wird, von welchen jeder doppelt wirkend ist und welche Kraft ist zum Betriebe beider Cylinder erforderlich?

Wir wählen eine Kolbengeschwindigkeit $= 0{,}90$ pro Sekunde. Jeder Cylinder hat die Hälfte, also 0,600 *cbm*, zu komprimieren. Der erforderliche Cylinderquerschnitt wird $\frac{0{,}600}{0{,}900} = 0{,}660\ qm$, bezw. die lichte Weite $= 0{,}920\ m$.

Geben wir dem Kolben einen Hub $= 1{,}500\ m$, so ist die Anzahl der Doppelhube oder Umdrehungen der Kurbelwelle:

$$u = 60 \times \frac{0{,}90}{2 \times 1{,}5} = 18 \text{ pro Minute.}$$

Theoretisch wird dann eine Betriebskraft nötig von:

$$Nu = vp \log \text{nat.} \frac{12}{1} = 1{,}20 \times 10330 \times \log \text{nat. } 12 = 30680\ m/kg.$$

$$\frac{30680}{75} = 409 \text{ P.S.}$$

Berücksichtigen wir dabei noch die Temperaturerhöhung infolge der Kompression, so wird:

$$Nu = vp \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right] = 1{,}200 \times 10300 \times 3{,}44\ [(12)^{0{,}2907} - 1].$$

Es ist zunächst $(12)^{0{,}2907} = \text{Num. log } [0{,}2907 \times \log 12] = 2{,}06$; der ganze Wert in der Klammer $2{,}06 - 1 = 1{,}06$, und es wird daher

$$Nu = 1{,}200 \times 10300 \times 3{,}44 \times 1{,}06 = 45069\ m/kg = 601 \text{ P.S.}$$

Der Unterschied wird demnach bedeutender, je grösser der Druck der komprimierten Luft wird.

22. Beispiel. Zum Betriebe der Bohrmaschinen waren auf der Nordseite des Gotthardtunnels mehrere Luftkompressoren verschiedener Systeme auf-

Digitized by Google

gestellt, welche die Luft auf 7 Atmosphären Überdruck komprimierten. Jedes dieser Systeme bestand aus drei an einer gemeinschaftlichen Kurbelwelle angebrachten Cylindern von 420 *mm* Kolbendurchmesser und 650 *mm* Hub, welche auch doppeltwirkend waren und 80 Umdrehungen pro Minute machten. Zur Reduzierung der erhöhten Temperatur wurde in den Cylinder Wasser eingespritzt. Welches Quantum komprimierter Luft lieferte ein solches System, wenn man von den Nebenhindernissen und der beim Komprimieren eintretenden Temperaturerhöhung absieht.

Es ist bei 80 Umdrehungen und 650 *mm* Hub die Kolbengeschwindigkeit pro Sekunde: $\frac{80 \times 2 \times 0{,}65}{60} = 1{,}733\ m.$

Der Querschnitt der Cylinder ist 0,1385 *qm* und das vom Kolben durchlaufene Volumen

$= 0{,}1385 \times 1{,}733 = 0{,}240\ cbm$ in der Sekunde

oder $= 0{,}240 \times 60 = 14{,}40\ cbm$ in der Minute.

Die drei Cylinder saugten also $3 \times 14{,}40 = 43{,}20\ cbm$ Luft pro Minute an, und lieferten $\frac{43{,}20}{8} = 5{,}4\ cbm$ auf 8 Atm. Druck komprimierte Luft in der Minute.

Die nötige Betriebskraft war daher theoretisch:

$$Nu = v\,p \log \text{nat.} \frac{p^2}{p} = 3 \times 0{,}240 \times 10330 \log \text{nat.}\ 8 = 15391\ m/kg = 205\ \text{P. S.}$$

Im Vorstehenden wurden nur die Einrichtungen zur Ausnutzung »gepresster Luft« erörtert. Anlagen, welche mit »evacuierten Räumen und Röhren« arbeiten, kommen viel häufiger vor, z. B. bei der pneumatischen Post, bei Eisenbahnwagen-Bremsen und bei Kanalisations-Anlagen. Natürlich hat man dabei immer nur eine Atmosphäre Luftdruck zur Verfügung. Die technischen Einrichtungen hierzu sind prinzipiell nicht verschieden von den hier erörterten und haben wir daher von einer besonderen Besprechung derselben abgesehen.

Digitized by Google

Die elektrische Kraftübertragung.

Sobald es sich heutzutage um Übertragung von Kräften auf weite Entfernung handelt, kommt nur mehr die Elektrizität als Vermittlerin in Betracht, und wollen wir deswegen diesem Kapitel einen etwas grösseren Platz einräumen. Auch hier trifft die allgemeine Anordnung zu, dass vorerst eine Maschine — ein Generator — nötig ist, welche die vorhandene Energie in Elektrizität umsetzt; wir nennen dieselbe Dynamomaschine oder kurzweg Dynamo.

In zweiter Reihe brauchen wir, sehr einfach und praktisch, Drähte zur Fortleitung des elektrischen Stromes, der dann drittens mittels Elektromotoren oder geeigneten, direkt wirkenden Apparaten die übertragene Energie der Ausnutzung zuführt.

A. Gleichstrom.

Die Dynamomaschine und deren Konstruktion hier ausführlich zu erörtern, wäre nicht empfehlenswert; es muss uns hier gestattet sein und genügen, das Wesen und die Funktionsweise solcher Elektrizitätserzeuger als bekannt vorauszusetzen oder dieselben als Quellen elektrischer Energie zu bezeichnen, die letztere (nach dem Produkt »Voltampère«) in Form elektrischer Spannung und elektrischen Stromes liefern.[1]) Die elektrische Spannung wird nach »Volt«, die Stromstärke nach »Ampère« gemessen; das Produkt Voltampère wird gewöhnlich mit »Watt« bezeichnet und hat eine treffliche Analogie im bekannten Produkt Meterkilogramm.[2])

---

[1]) Anmerkung. Siehe die im gleichen Verlage erschienenen Werke: Krämer, Konstruktion und Berechnung von Gleichstrom-Maschinen. II. Aufl. Schmidt-Ulm, Die Gleichstrom-Dynamomaschinen und Motoren.

[2]) Anmerkung.

Tabelle

der elektrotechnischen Einheiten, welche für die Praxis besonders wichtig sind:

Volt: Die Einheit der Spannung, d. h. des Druckes, unter welchem der elektrische Strom den Leiter durchfliesst, heisst das Volt (V).

Ohm: Die Einheit des Widerstandes, welchen ein Leiter dem Durchgang des Stromes entgegensetzt, heisst das Ohm (Ω). 1 Ω ist gleich dem Widerstande einer Quecksilbersäule von 1,063 *m* Länge und 1 *qmm* Querschnitt bei 0° C.

Ampère: Das Maass für die Stromstärke ist das Ampère (Amp.). 1 Amp. ist die Stärke desjenigen Stromes, welcher mit der Spannung 1 V einen Leiter vom Widerstande 1 Ω durchfliesst.

Digitized by Google

Zu unseren Betrachtungen interessieren hier hauptsächlich jene Faktoren, welche den Wirkungsgrad der Dynamos bestimmen; wir haben daher vor allem die Kraftverluste zu erörtern. Letztere entstehen infolge:

1. Erwärmung der Drähte im Anker und den Erregermultiplikationen der Elektromagnete (die Joulesche Wärme oder der Joulesche Verlust);
2. der magnetischen Reibung (Hysteresis);
3. der magnetischen Wirbelströme;
4. der Selbstinduktion;
5. der gegenseitigen Induktion in den Ankerspulen;
6. der Kurzschlüsse der Ankerspulen;
7. der elektrischen Übergangswiderstände an den Stromabnehmern (Bürsten);
8. der gegen- } magnetisierenden Wirkungen der Ankerwickelung;
9. der quer- }

ferner:

10. infolge zu hoher Tourenzahl, die nicht beabsichtigt ist;
11. infolge zu hoher Stromstärken;

ferner:

12. infolge mechanischer Widerstände, und zwar:
    a) in den Lagern, an Zapfen und Bürsten;
    b) durch Reibung an der Luft;
    c) durch mangelhafte Riemenspannung und Riemengleiten.

Watt: Die Leistung (Energie) eines elektrischen Stromes von 1 Amp. bei 1 Volt Spannung (= 1 Amp. × 1 Volt) heisst das Volt-Ampère oder Watt. 1 Kilowatt = 1000 Watt. 736 Watt = 1 Pferdestärke.

Wattstunde ist diejenige Arbeit, welche von dem Strom 1 Amp. bei 1 V Spannung in 1 Stunde geleistet wird. 1 Kilowattstunde = 1000 Wattstunden.

Coulomb: Die Elektrizitätsmenge, welche von der Stromstärke 1 Amp. in 1 Sekunde befördert wird, heisst 1 Coulomb.

Kapazität einer Akkumulatoren-Batterie ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche die geladene Batterie bei der Entladung abgiebt. Die Kapazität wird gemessen nach Ampère-Stunden. 1 Amp.-St. = 3600 Coulomb.

Pferdestärke:

1 englische Pferdekraft H. P. = 550 Fusspfund pro Sekunde
= 746 Watt.
1 metrische Pferdekraft P. S. = 75 *m/kg* pro Sekunde
= 736 Watt.

Um gewöhnliches Maass auf absolutes umzurechnen, setzt man ersteres in Gramm und Centimeter an und multipliziert mit *g* (980). Bei der umgekehrten Prozedur wird man mit *g* zu dividieren haben.

Die »Dyne« ist jene Kraft, welche der Masse eines Grammes in der Sekunde einen Geschwindigkeitszuwachs von 1 *cm* erteilt.

Unter »Erg« versteht man die von einer Dyne geleistete Arbeit, wenn dabei das Objekt des Angriffs veranlasst wird, den Weg von 1 *cm* zu durchlaufen

Digitized by Google

Schliesslich dürfen nach Konstruktionsfehler, wie z. B. Mängel in der elektrischen oder magnetischen Isolation, elektrische und magnetische Kurzschlüsse u. s. w. nicht unberücksichtigt bleiben.

Das ist eine bedeutende Liste von Faktoren, die Kraftverluste veranlassen, und es wird schwierig sein, in der Praxis auf alle diese Umstände dauernd Rücksicht zu nehmen. Das ist aber gar nicht immer nötig; es genügt zumeist die Leerlaufarbeit der Dynamo bestimmen zu können, und erst wenn diese als allzuhoch befunden wird, ist das Suchen des Fehlers nach obiger Liste zu empfehlen.

Um die Leerlaufarbeit einer Dynamo zu ermitteln, muss man die zu ihrem Betrieb aufgewendete mechanische Arbeit ziffermässig bestimmen, was entweder durch Bremsen des Primärmotors (mittels des Prony'schen Zaumes) oder durch Aufnahme von Indikator-Diagrammen an Dampfmaschinen, durch Anwendung von Dynamometern bei Wellentransmissionen oder auch nach elektrischen Methoden geschehen kann.

Die auf die Welle einer Dynamo übertragene Arbeit pro Sekunde ist:

$$A = P d n_1 \; m/kg,$$

wenn P = Zugkraft, d = Durchmesser und n_1 = Tourenzahl pro Sekunde.

Wir werden bei späteren Ausführungen zeigen, wie die Arbeit elektrischer Maschinen gemessen wird und gehen nunmehr daran, die Wirkungsgrade, mit denen Dynamos arbeiten, zu erörtern.

Der »elektrische Wirkungsgrad« ist ein Wert, der nur für den Konstrukteur und auf dem Probierfeld Bedeutung hat, wir brauchen denselben hier nicht weiter in Betracht zu ziehen.

Dagegen ist das Verhältnis der von der Dynamo an den Klemmen abgegebenen elektrischen Energie zu der für die Rotation des Ankers aufgewendeten Arbeit, d. i. der »mechanische Wirkungsgrad«, jene wichtige Grösse, welche den Konstrukteur sowohl als auch den Betriebstechniker in eminenter Weise interessiert.

Bezeichnen wir (nach Kittler) mit

e die Klemmenspannung in Volt,
i die Stromstärke ausserhalb der Maschine in Ampère,
r den äusseren Widerstand,
R_1 den Widerstand des Ankers an den Bürsten gemessen,
R_2 den Widerstand der Elektromagnetspulen in Ohm,
K die Leerlaufarbeit in Watt,
L den totalen elektrischen Effekt,
t die Zeit,
l den Nutzeffekt, und
η den mechanischen Wirkungsgrad,

Digitized by Google

dann ist der Kraftbedarf einer Hauptstromdynamo:

$$A = ei + (i^2 R_1 + i^2 R_2 + K) \text{ in Watt}$$

und der Kraftbedarf einer Nebenschlussdynamo:

$$A = ei + \left[\left(i + \frac{e}{R_2}\right)^2 R_1 + e\,\frac{e}{R_2} + K\right] \text{ in Watt,}$$

$\frac{A}{9{,}81}$ ergiebt die Arbeit in *m/kg*,

$\frac{A}{736}$ » » » » P. S.

Für eine Hauptstromdynamo ist:

$$\eta = \frac{l}{L} = \frac{ei}{ei + (i^2 R_1 + i^2 R_2 + K)}, \text{ d. h.}$$

$$\eta = \frac{\text{der an den Klemmen abgegebenen elektrischen Arbeit}}{\left.\begin{array}{c}\text{die an den Klemmen}\\ \text{abgegebene elektrische}\\ \text{Arbeit}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{c}\text{der im Anker aufgewendeten}\\ \text{elektrischen Arbeit,}\\ + \text{ der in den Elektromagnetspulen}\\ \text{aufgew. elektr. Arbeit,}\\ + \text{ der Leerlaufarbeit.}\end{array}\right.}$$

Für die Nebenschlussdynamo ist:

$$\eta = \frac{l}{L} = \frac{ei}{ei + \left[\left(i + \frac{e}{R_2}\right)^2 R_1 + e\,\frac{e}{R_2} + K\right]}, \text{ d. h.}$$

$$\eta = \frac{\text{der an den Klemmen abgegebenen elektrischen Arbeit}}{\left.\begin{array}{c}\text{die an den Klemmen}\\ \text{abgegebene elektrische}\\ \text{Arbeit}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{c}\text{der im Anker aufgewendeten}\\ \text{elektrischen Arbeit,}\\ + \text{ der in den Elektromagnetspulen}\\ \text{aufgew. elektr. Arbeit,}\\ + \text{ der Leerlaufarbeit.}\end{array}\right.}$$

Um K ziffermässig zu bestimmen, lässt man die Dynamo als Motor bei der für die Dynamo vorgeschriebenen Tourenzahl laufen. Man ermittelt dann die zugeführten Watt und die Leistung des Motors. Die Differenz dieser beiden Grössen ist der Wert für K.

Bei der Nebenschlussdynamo bleibt die für die Magnetisierung aufzuwendende Arbeit, sowie die Leerlaufarbeit bei allen Belastungen annähernd dieselbe. Bei der Hauptstrommaschinen aber verändern alle Änderungen der äusseren Stromstärke auch die Magnetisierungsarbeit in den Elektromagneten.

Während der bei den grössten Dynamos erzielbare elektrische Wirkungsgrad mit 0,96 angesetzt werden kann, übersteigt der mechanische Wirkungsgrad in der Regel die Ziffer von 0,94 nicht

Digitized by Google

und sind Zusagen auf grösseren Wirkungsgrad mit Vorsicht aufzunehmen. Mit einer mechanischen P. S. an der Welle der Dynamo kann man also im günstigsten Falle $736 \times 0{,}94 = 690$ Watt an den Klemmen erwarten. Je kleiner die Maschine, desto geringer wird der Wirkungsgrad, wie nachstehende Tabelle zeigt:

P. S. . . .	1000	500	100	50	20	10	5	1
η	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,88	0,81	0,75
Watt pro P. S.	690	685	680	670	665	645	600	550

Untersuchen wir nun nach obiger Liste (Seite 48), in welcher Weise die Kraftverluste zu beurteilen sind:

ad 1. Die Erwärmung der Drähte ist gar nicht zu umgehen; denn nach dem Joule'schen Gesetz wird jeder Leiter beim Durchgange des elektrischen Stromes erwärmt und ist die erzielte Wärmemenge $= 0{,}24\, i^2 r t$ Gramm-Kalorien. Man ersieht aus dieser Formel, dass die Wärmemenge zwar im gleichen Verhältnis mit dem Quadrate der Stromstärke wächst, dass aber die Verringerung des Widerstandes (r), also die Verwendung recht dicker Drähte ein Mittel bietet, die Wärmeerzeugung zu verringern.

Man kann die vorerwähnte (Joule'sche) Formel, die aus dem Ohm'schen Gesetz abgeleitet wird, auch schreiben:

$$Q = 0{,}24\, e i t \text{ Gramm-Kalorien.}$$

Der Faktor 0,24 ergiebt sich aus folgender Betrachtung:

$424\ m/kg = 1000$ Gramm-Kalorien; demnach $1\ m/kg = \frac{1000}{424}$ Gramm-Kalorien.

$$1 \text{ Watt} = \frac{1}{9{,}81}\ m/kg = \frac{\frac{1000}{424}}{9{,}81} = 0{,}24 \text{ Gramm-Kalorien.}$$

Um ein Maass zu haben, wie weit man in der Dicke der Drähte gehen darf, citieren wir hier eine Angabe von Schulz, der empfiehlt, die im Anker erzeugte oder verbrauchte Wattzahl ($J_1^2 R_1$) gleich zu setzen 0,1 mal der Oberfläche des Ankers in *qcm*.

$$J_1^2 R = 0{,}1\ Q = 0{,}1 \left(\frac{\pi D^2}{2} + \pi D b \right).$$

ad 2. Gesetzt den seltenen Fall, man hätte ganz unmagnetisches Eisen und man würde dasselbe in der bekannten Weise mittels elektrischer Einflüsse magnetisieren, dann verläuft die Magnetisierungskurve so, wie dies in der umstehenden Fig. 40, S. 52, angedeutet ist und woraus wir ersehen, dass das Eisen nie mehr »nullmagnetisch« wird. Bei jeder Auf- oder Abmagnetisierung ist eine Gegenkraft (eine Verzögerungskraft, Koërcitivkraft oder ein Reibungswiderstand) vorhanden, die überwunden werden muss. Jede Widermagnetisierung erleidet eine Verzögerung, die man »Hysteresis« nennt.

Digitized by Google

Nach Ewings Untersuchungen ist die auf diese Weise absorbierte Energie bei weichen Eisen am geringsten (ca. 10000 absolute Einheiten pro *kg*) und nimmt zu mit der Härte des Materiales (ca. 70000 absolute Einheiten pro *kg* härtesten Stahl). Die so absorbierten Energiebeträge werden in den bezüglichen elektrischen Maschinen und Apparaten in Wärme umgesetzt und muss die Abkühlungsfläche darnach bemessen sein.

Bei Wechselstrommaschinen und Transformatoren werden die Erwärmungen durch Hysteresis natürlich und zwar mit der Zahl der Polwechsel besonders mächtig und störend auftreten, weshalb die Hysteresis auch bei der Bestimmung der Polwechsel sehr maass-gebend ist.

Nach der Bestimmung von Steinmetz werden bei p Polwechsel pro Sekunde in 1 *kg* Eisen

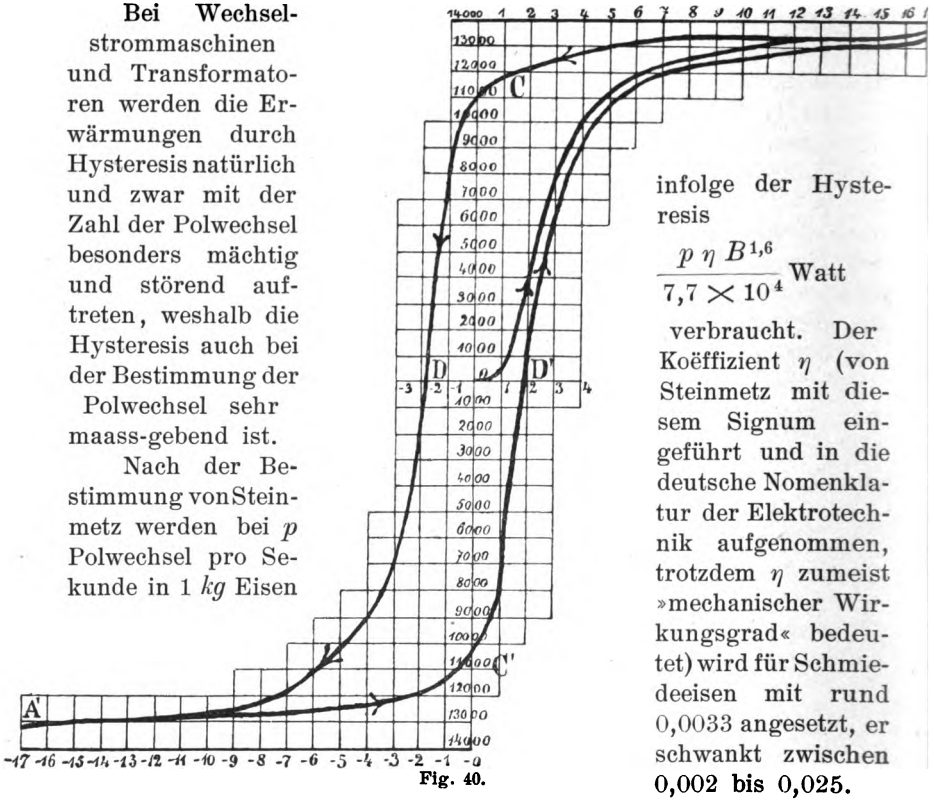


Fig. 40.

infolge der Hysteresis

$$\frac{p\,\eta\,B^{1,6}}{7{,}7 \times 10^4}\ \text{Watt}$$

verbraucht. Der Koëffizient η (von Steinmetz mit diesem Signum eingeführt und in die deutsche Nomenklatur der Elektrotechnik aufgenommen, trotzdem η zumeist »mechanischer Wirkungsgrad« bedeutet) wird für Schmiedeeisen mit rund 0,0033 angesetzt, er schwankt zwischen 0,002 bis 0,025.

7,7 bedeutet das spezifische Gewicht des Elektromagneteisens. Die Fig. 41 zeigt graphisch die Wattverluste durch Hysteresis unter verschiedenen Verhältnissen.

ad 3. Da in jeder Dynamo während des Betriebes mindestens zwei magnetische Massen und verschiedene geschlossene Drahtspulen ihre relative Lage fortgesetzt zu einander ändern, so müssen auch in den geschlossenen Eisenmassen (Foucault'sche) Induktionserscheinungen auftreten, welche ihren Ausdruck in den sogenannten »Wirbelströmen« finden. Diese werden ebenfalls in Wärme um-

Digitized by Google

gesetzt. Sie sind gering, wenn die Eisenmassen lamelliert und die Lamellen magnetisch voneinander isoliert sind.

Die Wirbelströme werden stärker und zwar direkt proportional dem Quadrat der Tourenzahl oder, besser gesagt, der Zahl der Kreisprozesse und dem Quadrat der Magnetisierungsintensität.

Der Verlust durch Wirbelströme kann bei Verwendung durchaus lamellierten Kernmateriales vernachlässigt werden; sonst aber wird der Gesamtenergieverlust ad 2 und 3 nach der Formel berechnet:

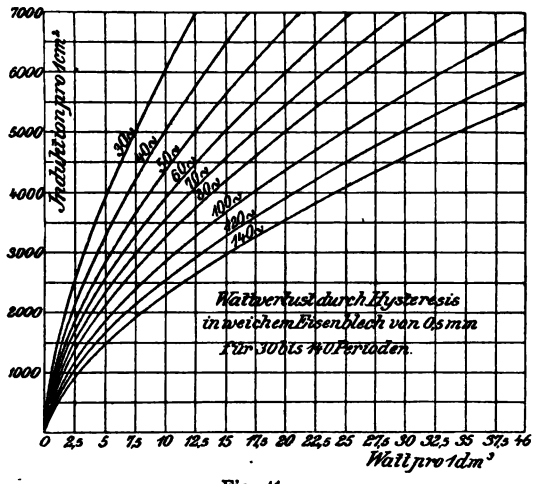


Fig. 41.

$$H = \eta B^{1,6} + \varepsilon N B^2,$$

wobei B die Zahl der Kraftlinien des Kraftstromes in 1 *qcm* des Querschnitts, N die Zahl der Kreisprozesse und ε (ähnlich wie das oben erläuterte η) einen Koëffizienten der Wirbelströme bedeutet. (Fig. 42.) Fig. 43 zeigt die Kurven der Energieverluste durch Hysteresis und Wirbelströme.

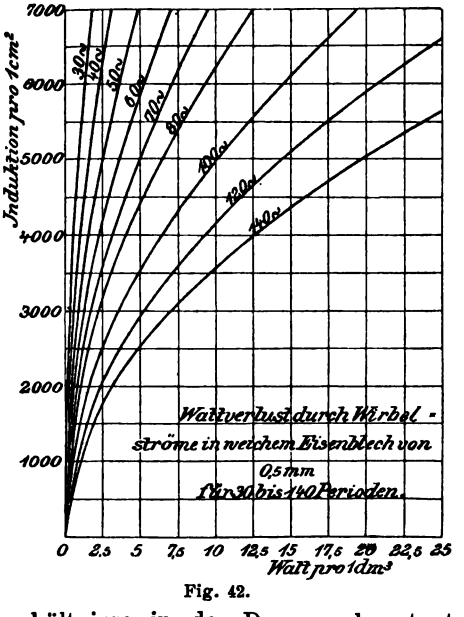


Fig. 42.

ad 4. So oft in irgend einem Leiter ein elektrischer Strom zu cirkulieren beginnt, seine Intensität ändert oder verschwindet, entstehen im selben Leiter Induktionsströme, die auch beim Betrieb von Dynamos berücksichtigt werden müssen.

So lange nun die Stromverhältnisse in der Dynamo konstant bleiben, werden auch keine Kraftverluste infolge der Selbstinduktion zu beklagen sein.

Digitized by Google

Bei Wechselstrommaschinen aber haben die Selbstinduktionserscheinungen besondere Bedeutung und wird dies später ausführlich erläutert werden.

Berechnet wird der Selbstinduktionskoëffizient L nach der Formel:

$$L = \frac{4 \pi \varkappa^2 \mu q}{l}$$

($\varkappa$ = Windungszahl, μ = Durchlässigkeit für Kraftlinien, q und l Dimensionen der Kraftlinienträger).

ad 5. Ähnlich verhält es sich mit der gegenseitigen Induktion der Ankerspulen. Es unterliegt keinem Zweifel, dass Spulen, in denen ein stärkerer Strom fliesst als in benachbarten Spulen, auf letztere elektroinduktorisch wirken; aber auch hier ist zu bemerken, dass bei den ziemlich gleichmässigen Stromverhältnissen in Gleich-

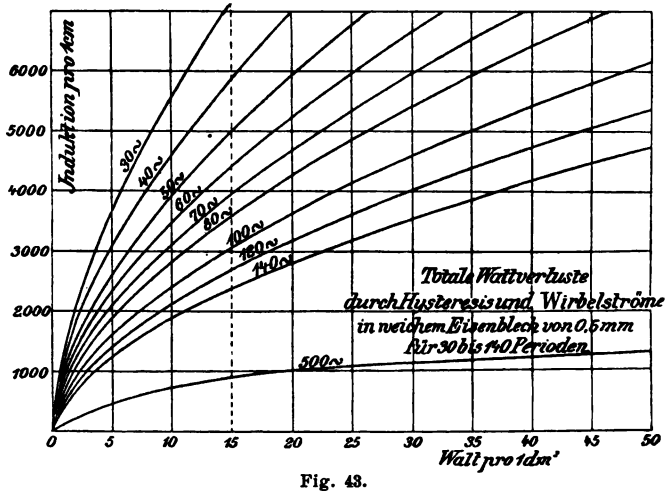


Fig. 43.

strommaschinen die Kraftverluste aus dieser Veranlassung unter normalen Verhältnissen gering sind.

ad 6. Dagegen sind die Kraftverluste, welche infolge Kurzschlusses der Ankerspulen entstehen, nicht unbedeutend. Sind die Kohlenbürsten so gestellt, dass sie gleichzeitig zwei Kollektorsegmente berühren (Fig. 44), so ist auch die dazwischen liegende Spule kurzgeschaltet und die Induktionswirkung auf solche Spulen für den äusseren Effekt verloren. Das ist aber nicht der alleinige Nachteil solcher Anordnungen; beim Schliessen und Öffnen der kurz geschlossenen Spule entstehen Selbstinduktionswirkungen, welche auf die Bahn des Hauptstromes übergehen.

Die daraus erwachsenden Kraftverluste allgemein ziffermässig auszudrücken, dürfte kaum möglich sein; sie hängen allzuviel von der besonderen Konstruktion der einzelnen Maschinentypen ab. Man

Digitized by Google

kann diese Verluste aber durch Beschränkung der Windungen in den einzelnen Spulen auf ein Minimum herabdrücken. Je weniger Windungen in den einzelnen Spulen des Ankers, desto geringer sind die Selbstinduktionswirkungen und die Kraftverluste infolge Kurzschlusses.

Berechnen kann man den Effektverlust infolge Kurzschlusses einer Spule etwa allgemein nach der Formel:

$$\text{Effektverlust} = \frac{n\,l\,i_1^2}{60 \times 4}.$$

Allerdings wenn Kurzschlüsse von Ankerspulen infolge von Isolationsfehlern in den Drähten oder auf den Kollektor veranlasst werden — und das kommt recht häufig vor — dann wachsen die Kraftverluste oft bedeutend und beeinflussen die Wirkungsgrade ganz wesentlich.

Beim Übergang des Stromes vom Kollektor auf die Stromabnehmer (Bürsten) hat ersterer eine Stelle zu passieren, welche, auch bei scheinbar vorzüglicher Berührung, eine Kontaktunterbrechung veranlasst und ist dieser Übergangswiderstand ganz sicher schon unter normalen Verhältnissen und bei idealer Ausführung eine Quelle von Kraftverlusten. Ist aber der Kollektor mehr oder weniger unrund oder auch sonstwie fehlerhaft, oder sind die Bürsten mangelhaft eingestellt oder vibrieren dieselben, dann wachsen die Übergangswiderstände und damit die Kraftverluste zu einer Grösse, die nicht unberücksichtigt bleiben kann.

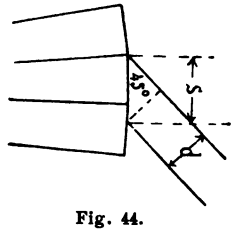


Fig. 44.

ad 7 und 8. Jeder im magnetischen Felde rotierende Anker einer Gleichstrommaschine bildet auch einen Elektromagneten (Eisenkern mit einer geschlossenen Drahtspirale umgeben) und wirkt der durch diesen erzeugte Kraftstrom dem induzierenden Hauptkraftstrom entweder direkt entgegen oder die Längsrichtungen der beiden magnetischen Kraftströme bilden einen dem Rechten sich mehr oder weniger nähernden Winkel. Diese störende elektromagnetische Wirkung wird »Ankerreaktion« genannt; sie schwächt das beabsichtigte Feld und muss ihre schädigende Wirkung durch Vermehrung der Ampèrewindungen auf den Hauptelektromagneten aufgehoben werden. Es handelt sich also nur um die Frage: Wie viele Ampèrewindungen müssen für den Feldmagneten mehr aufgebracht werden, um der Wirkung der Ankerreaktion zu begegnen, bezw. die letztere unschädlich zu machen?

Wir verzeichnen darüber mehrfache Angaben: Ein hervorragender Konstrukteur lehrt, dass der Ankerreaktion bei zweipoligen Maschinen

Digitized by Google

genügend begegnet ist, wenn sich die Ampèrewindungen des Feldmagneten zu jenen des Ankers verhalten wie 2 : 1.

Eine sehr bekannte grosse Maschinenfabrik beantwortet die oben präzisierte Frage direkt mit der Formel:

$$A\,W_R = \sqrt{A\,W^2_{\text{total}} + \left(\frac{i_1}{2} N_1\right)^2}$$

(i_1 = Stromstärke im Anker, N_1 = Windungen auf dem Anker).

Es giebt (siehe Kapp's Werke) auch vortreffliche graphische Methoden, um die Antwort auf obige Frage zu finden.

ad 9 und 10. Gleichstrommaschinen arbeiten natürlich wie alle anderen Maschinen nur bei voller Belastung und einer bestimmten Tourenzahl mit dem höchst erreichbaren Wirkungsgrad. Dynamos sind dann voll belastet, wenn sie veranlasst werden, bei normalen Volt die normale Stromstärke abzugeben.

Wird infolge eines Umstandes (Kurzschluss) die Maschine gezwungen, eine höhere als die normale Stromstärke abzugeben, oder arbeitet die Dynamo infolge einer Änderung des normalen Zustandes der Primärmaschine mit erhöhter Tourenzahl, dann verringert sich der Wirkungsgrad bis zu jenem Zustand, bei welchem die Dynamo infolge der erwähnten abnormalen Betriebsverhältnisse überhaupt Schaden erleidet. (Siehe die bezüglichen Tabellen im Anhang.)

ad 11. Die Kraftverluste infolge mechanischer Reibungen werden nach den allgemeinen maschinentechnischen Regeln beurteilt und darnach auch gemessen.

ad 12. Die Stromabnehmer drücken auf den Kollektor und wenn dieser Druck auch möglichst gering sein soll, so erzeugt er jedenfalls einen Reibungswiderstand, der unter Verbrauch von Energie überwunden werden muss. Eine ziffermässige Feststellung der Grösse dieses Reibungswiderstandes ist wohl nur mittels Messung möglich.

Man wird nicht viel fehlen, wenn man die sub 11 erwähnten Kraftverluste bei einer gut gebauten Dynamo (deren $\eta = 0{,}90$) mit 3 % und dann die sub 1 bis 10 erläuterten Verluste ebenfalls mit 3 % der Gesamtleistung ansetzt. Wenigstens kann man das von einer modernen, guten Dynamo verlangen. Wie sich dann die Verhältnisse bei den kleineren Maschinen gestalten, darüber giebt eine Tabelle im Anhang dieses Werkes annähernd Aufschluss.

Im Vorstehenden sind die normalen Kraftverluste erläutert. Bei elektrischen Maschinen hat man aber Umstände zu berücksichtigen, die bei anderen maschinellen Betrieben einflusslos sind, während sie hier den Wirkungsgrad oft gewaltig herabdrücken können; so werden z. B. bei Dynamos in der Nähe situierte Eisen- oder Stahlmassen Verzerrungen oder Ableitungen des magnetischen Kraftstromes ver-

Digitized by Google

anlassen; feuchte Luft oder gar nasse Dämpfe werden auf die elektrische Spannung ganz wesentlich einwirken; ein Mangel in der Centrierung des Ankers, ein Übergewicht des letzteren übt auf die Leistungsfähigkeit einer elektrischen Maschine einen sehr ungünstigen Einfluss aus, desgleichen: einseitiges Auflaufen und ungleichmässige Spannung des Riemens, magnetisierbarer und auch nicht magnetisierbarer Metallstaub u. v. a. m.

Würde man permanente Stahlmagnete verwenden, so hätte man den magnetischen Kraftfluss kostenlos. Elektromagnete verursachen eine Verminderung des Wirkungsgrades infolge des nicht ohne Kosten zu beschaffenden elektrischen Erregerstromes. Da aber mit Elektromagneten ein sehr starkes, besonders aber ein nach Belieben regulierbares magnetisches Feld beschafft werden kann, nimmt man die verhältnismässig geringeren, oben erwähnten Nachteile und Kosten gerne mit in Kauf.

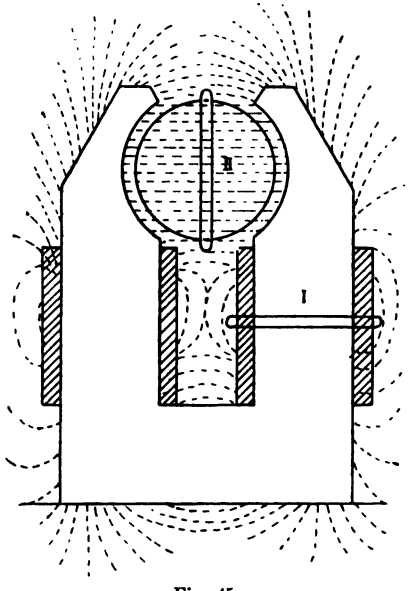


Fig. 45.

Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades moderner elektrischer Maschinen muss aber besonders auch auf die magnetische Streuung Rücksicht genommen werden. Nicht alle Teile des mittels elektrischen Stromes erzeugten Kraftflusses werden nutzbar gemacht; ein Teil der Kraftlinien verläuft an Stellen, die zur Nutzwirkung nicht herangezogen werden können.

In welcher Weise die Kraftlinien bei einer offenen zweipoligen Maschine zerstreut werden, zeigt die Fig. 45. Der Streuungskoëffizient, d. i. die Ziffer, mit welcher man die Zahl der Ampèrewindungen für die Feldmagnete multiplizieren muss, um die Verluste durch Streuung hereinzubringen, schwankt zwischen 1,1 bis 2. Er hängt ab:

1. von der Form des Eisengestelles und zwar ist er bei geschlossenen Maschinen (Lahmeyer Type) am geringsten, bei offenen (Fig. 45) am grössten;

2. von der Grösse der Maschinen; je grösser diese, desto geringer wird die Streuung, und

Digitized by Google

3. von der Sättigung; je grösser diese, desto grösser wird auch die Streuung.

Alle im Vorstehenden aufgezählten Umstände beeinflussen also den elektrischen Wirkungsgrad der elektrischen Gleichstrommaschinen und gilt das alles sowohl für Dynamos als auch für die Elektromotoren; denn dem Prinzipe nach unterscheiden sich Gleichstromelektromotoren in nichts von den Gleichstromdynamos und jede von letzteren kann mit gleichem Wirkungsgrad auch als Elektromotor verwendet werden. (Allerdings ist die Verwendung eines Elektromotors als Stromerreger weniger zu empfehlen.)

Bleiben wir bei den auf Seite 49 angegebenen Bezeichnungen, so ist die Leistung eines Hauptstrommotors:

$$A_1 = ei - (i^2 R_1 + i^2 R_2 + K) \text{ in Watt;}$$

$$\frac{A_1}{9{,}81} \text{ giebt } m/kg; \quad \frac{A_1}{736} \text{ giebt P. S.}$$

Die Leistung eines Nebenschlussmotors:

$$A_1 = ei - \left[\left(i - \frac{e}{R_2}\right)^2 R_1 + e\,\frac{e}{R_2} + K\right] \text{ in Watt}$$

und wir erhalten als Formeln für den Wirkungsgrad:

Beim Hauptstrommotor:

$$\eta = \frac{l}{L} = \frac{ei - (i^2 R_1 + i^2 R_2 + K)}{ei}, \text{ d. h.}$$

$$\eta = \frac{\left.\begin{array}{l}\text{der gesamten}\\ \text{aufgenommenen}\\ \text{elektrischen Arbeit}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{der im Anker aufgewendeten}\\ \quad\text{elektrischen Arbeit,}\\ + \text{der in den Elektromagnetspulen}\\ \quad\text{aufgew. elektr. Arbeit,}\\ + \text{der Leerlaufarbeit.}\end{array}\right.}{\text{gesamte aufgenommene elektrische Arbeit.}}$$

Beim Nebenschlussmotor:

$$\eta = \frac{l}{L} = \frac{ei - \left[\left(i - \frac{e}{R_2}\right)^2 R_1 + e\,\frac{e}{R_2} + K\right]}{ei}, \text{ d. h.}$$

$$\eta = \frac{\left.\begin{array}{l}\text{der gesamten}\\ \text{aufgenommenen}\\ \text{elektrischen Arbeit}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{der im Anker aufgewendeten}\\ \quad\text{elektrischen Arbeit,}\\ + \text{der in den Elektromagnetspulen}\\ \quad\text{aufgew. elektr. Arbeit,}\\ + \text{der Leerlaufarbeit.}\end{array}\right.}{\text{gesamte aufgenommene elektrische Arbeit.}}$$

Die von einem Nebenschlussmotor verbrauchte Arbeit zu messen, ist eine recht einfache Sache. Es genügt ein Voltmeter und ein

Digitized by Google

Ampèremeter in jener Ausführung, wie wir sie auf unseren Schaltbrettern verwenden; man hat nur darauf zu sehen, dass die Skalen das erforderliche Messbereich umfassen. Die Klemmen des Voltmeters verbindet man direkt mit den Klemmen des Elektromotors; das Ampèremeter schaltet man in eine der direkten Leitungszuführungen zum Elektromotor. Man notiert nun die während des Betriebes angezeigten Volt und Ampère; das jeweilige Produkt Voltampère zeigt die in den betreffenden Messmomenten verbrauchten Watt (bezw.

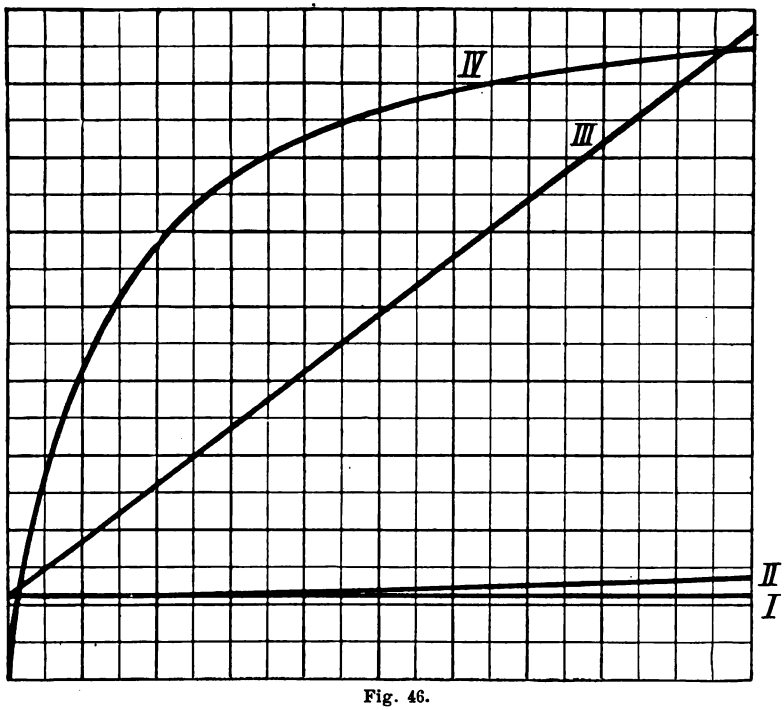


Fig. 46.

m/kg, bezw. P. S.), und die Leistung des Elektromotors ist nun, wenn man den Wirkungsgrad desselben kennt, leicht nach der Formel zu ermitteln:

Volt × Ampère × Wirkungsgrad = Leistung des Motors.

Allerdings ist der Wirkungsgrad bei verschiedener Belastung verschieden, wie das Diagramm (Fig. 46) zeigt. In demselben bedeutet I die Leerlaufarbeit, dieselbe bleibt in allen Fällen gleich und ergiebt hier eine gerade Linie; II ist die Kurve der Ankerverluste; III zeigt die Grösse der verbrauchten elektrischen Energie in Watt; IV ist die Kurve des Wirkungsgrades, wenn wir als Abscissen die

Digitized by Google

Pferdestärken, als Ordinaten die Watt bezw. die Prozentzahlen des Wirkungsgrades ansetzen.

Aber auch eine genauere Ermittelung der Leistung verursacht unter Anwendung der obigen Formeln keine besonderen Schwierigkeiten. Man muss nach denselben nur noch die im Anker und den Elektromagneten verbrauchte elektrische Energie, sowie die Leerlaufarbeit messen. Dazu ist es nötig, die zugeführte Stromstärke beim Leerlauf zu ermitteln und wir können die obige Formel in handlicherer Art schreiben:

$$A_1 = \frac{e\,i - (e\,J_0 + R_1 J_1^2)}{736} \text{ in P.S.,}$$

wobei J_0 die Stromstärke beim Leerlauf, und

J_1 » » im Anker $= i + \frac{e}{R_2}$ bedeutet.

Wenn wir also die Widerstände des Ankers und der Elektromagnetspulen kennen, brauchen wir nur zu messen:

e die Klemmenspannung,
J_0 die Stromstärke beim Leerlauf, und
i » » bei der Arbeit,

dann können wir unter Anwendung der letzten Formel die Leistung des Motors gewiss leicht und sicher bestimmen.

(Wir übergehen hier absichtlich eingehendere Erörterungen über Compoundmaschinen; das sind bekanntlich Kombinationen von Hauptstrom- und Nebenschlussmaschinen. Die Coumpondschaltung bietet alle Vor- und Nachteile der beiden anderen Schaltungsarten; besonders tritt aber bei denselben nicht selten die so sehr störend wirkende Umpolarisierung auf, die immer den Betrieb auf kürzere oder längere Zeit unterbricht, ein Übelstand, der nur dort mit in den Kauf genommen werden kann, wo er in vorhinein als zulässig erachtet wird.)

Es ist bekannt, dass Elektromotore beim Betrieb eine elektromotorische Gegenkraft (E_2) erzeugen und die Stromverhältnisse im bezüglichen Schliessungskreis nach der Formel

$$J = \frac{E_1 - E_2}{\Sigma R} \text{ beurteilt werden müssen.}$$

Diese Formel giebt auch für die Betriebsverhältnisse maassgebende Anhaltspunkte; E_2 darf weder zu gross, noch zu klein werden.

Bezeichnet P die Zugkraft in kg, d den Durchmesser der Riemenscheibe in m, so gilt für die von der Primärkraftmaschine an der Dynamo geleistete Arbeit die Relation:

$$\frac{P_1\,\pi\,d_1\,n_1}{4500} = \frac{E_1\,J}{736}\,(1 + \text{Verlust in der Dynamo})$$

Digitized by Google

und beim Motor analog:

$$\frac{E_2 J}{736} (1 - \text{Verlust im Motor}) = \frac{P_2 \pi d_2 n_2}{4500},$$

woraus die Zugkraft P berechnet werden kann.

Zumeist verwendet man aber zu diesem Zwecke die Formel:

$$\text{Zugkraft } P = \frac{\Phi J}{9{,}81 \times 10^6},$$

es ist sodann Geschwindigkeit

$$v = \frac{l}{l B 10^{-8}} \qquad (\text{aus } e = l v B 10^{-8} \text{ Volt})$$

und die Tourenzahl

$$n = \frac{E 10^8 \times 60}{N \Phi} \qquad \left(\text{aus } E = \frac{n N \Phi}{60 \times 10^8}\right).$$

(Φ = Gesamtzahl der Kraftlinien, l = die Länge des Kupferleiters im Anker, B = die magnetische Induktion pro *qcm* des Eisenquerschnittes, N = die am Umfang gezählten Windungszahlen des Ankers.)

Um die Grösse eines Elektromotors zu bestimmen, richtet man sich nach der geringsten Umdrehungszahl, welche bei Motoren für Dauerbetriebe im gleichen Verhältnisse zur normalen Umdrehungszahl steht, wie die Leistung bei verringerter Umdrehungszahl zur normalen Leistung. Bei Motoren für Betriebe mit selbstveränderlicher Belastung bei nicht dauernden Leistungen soll die Grösse des Motors um 25 % höher gewählt werden.

Der angegebene normale Wirkungsgrad bezieht sich immer nur — wir wiederholen das — auf die Vollbelastung der Maschine.

Bei anderen Belastungsverhältnissen soll ein guter Elektromotor

bei	1/1	bis 3/4	Belastung	η normal	haben;	
»	3/4	» 1/2	»	soll η	1 %	geringeren
»	1/2	» 1/3	»	» η 2	» 3 »	Wirkungsgrad
»	1/3	» 1/4	»	» η 3	» 5 »	haben.

Motoren mit kleineren Umdrehungszahlen und kleineren Leistungen (auch im gleichen Modell) arbeiten natürlich auch mit geringeren Wirkungsgraden.

Tabelle zur Berechnung des Wirkungsgrades aus Watt und Pferdestärken.

Wirkungsgrad:																
75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
Wattleistung der Dynamo pro P. S.:																
550	560	565	575	580	590	595	605	610	620	625	635	640	650	655	660	670	675
Wattverbrauch des Motors pro P. S.:																
980	970	955	945	930	920	910	900	885	875	865	855	845	835	825	820	810	800

Digitized by Google

Nach diesen Ausführungen über die Wirkungsgrade der Dynamos und Elektromotoren erübrigt noch, das dritte Element der Kraftübertragung mit elektrischem Gleichstrom — die Leitungen — zu betrachten. Besteht die Leitung aus einer einfachen Hin- und Rückleitung, dann ist die Berechnung des Wirkungsgrades derselben ausserordentlich einfach.

In jeder Leitung wird beim Durchgange des elektrischen Stromes ein Teil der transportierten Energie in Wärme verwandelt und wir haben schon auf Seite 51 die bezüglichen Berechnungsformeln angeführt.

Die so erzeugte Wärme repräsentiert also einen und zwar unumgänglichen Verlust; es ist aber möglich, diesen Verlust ganz nach Belieben zu gestalten und zu regeln. Der Querschnitt der Leitungen wird nach der allgemeinen Formel:

$$q = \frac{\Sigma i l}{60\, v}$$

berechnet, wobei l die Länge des Drahtes in m, i die Stromstärke und $v = ir$ den Spannungsverlust in der Leitung bedeutet, Da die maximale Stromstärke zumeist eine gegebene konstante Grösse[1]) ist, so hat man es vollkommen in der Hand, durch Änderung des elektrischen Leitungswiderstandes (r) den Spannungsabfall v nach Belieben zu bestimmen. Der Energieverlust in der Leitung findet seinen Ausdruck in der Differenz der elektrischen Spannung an der Dynamo und am Motor, und bestimmt dieser Verlust den Wirkungsgrad. Man setzt letzteren selten niedriger an als $\eta = 0{,}98$, und nur bei wirklichen Fernleitungen wird hierfür manchmal wegen Kupferersparnis ein noch geringerer Wert gestattet.

Betrachten wir nun die Gesamtanordnung einer elektrischen Kraftübertragung mit Gleichstrom, z. B. an der Fig. 47. In einer Dynamo wird elektrische Energie erzeugt und mittels einer innerhalb gewisser Grenzen beliebig zu erweiternden Leitung zu einem der Dynamo ähnlichen Elektromotor überführt. Die elektrische Energie versetzt die Armatur (Ring oder Trommel) des Motors in Rotation und diese kann ebenso wie die Rotation eines Dampf- oder Gasmotors mittels direkten oder Riemenantriebes ausgenutzt werden. An Hilfsapparaten

---

[1]) In der Praxis kann die Stromstärke in einer Luftleitung nicht als eine konstante Grösse angesehen werden, da die Stützpunkte als Stromleiter funktionieren. Der Verfasser hatte Gelegenheit, einen mit Kohlenruss stark belegten Isolator aus Porzellan, nachdem derselbe 16 Jahre lang gedient hatte, auf seine Isolierfähigkeit zu prüfen. Von der Drahtauflagfläche bis zum unteren Rand zeigte dieser Isolator nur 100 Ohm Widerstand, nach gründlicher und andauernder Reinigung noch immer nur 4000 Ohm, während ein neuer Isolator derselben Form und Grösse über 100 000 Ohm Widerstand hatte.

Digitized by Google

verwendet man gewöhnlich einen Strommesser (*A*), mindestens eine Bleisicherung (*B*), in der Motorenstation den Schalthebel *S* und in der Primärstation den Kurzschliesser *K*, welcher bei Überschreitung der zulässigen Stromstärke die Magnetbewickelung der »Dynamo« kurz- und daher ausschliesst, sodass ein Stillestehen des Motors eintritt, damit Beschädigungen der Anlage verhindert werden.

Schon aus dem Schema ist es ersichtlich, dass dies eine Anordnung mit »Hauptstromschaltung« ist, bei welcher der Motor in entgegengesetzter Richtung wie die Dynamo läuft, und die nur gebraucht werden soll, wenn der Motor vollbelastet anlaufen muss und dauernd gleichmässig belastet bleibt.

Man verwendet so geschaltete Motoren fast nur bei Einzelschaltungen und fast nie bei elektrischen Systemen mit konstanter Klemmenspannung. Es ist bei derselben zu beklagen, dass sie bei unaufmerksamer Bedienung gerne »durchgehen«, wodurch sie selbst und alles Darangehängte gefährdet sind.

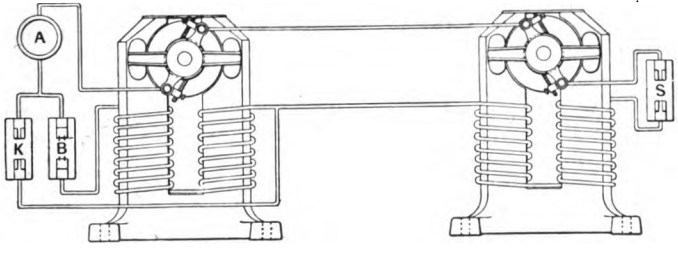


Fig. 47.

Sollen mehrere Motoren gleichzeitig betrieben werden, so verwendet man elektrische Anlagen mit konstanter Spannung und Motoren mit Nebenschlussschaltung. (Siehe Schaltungsschema Fig. 48.) Während Hauptstrommotoren belastet mit gleichbleibender Tourenzahl laufen, kann man bei Nebenschlussmotoren die Tourenzahl auf verschiedene Weise ändern, und zwar: a) durch Einschalten von Widerstand in den Ankerstromkreis und b) durch Einschalten von Widerstand in den Nebenschluss.

Den besten Wirkungsgrad wird man allerdings nur bei normaler Belastung, für welche der Motor gebaut ist, erreichen. Unter Umständen aber kann die Möglichkeit der Tourenveränderung mehr wert sein als der beste Wirkungsgrad, besonders auch dann, wenn wir Vergleichungen mit mechanischer Transmission unter gleichen Anforderungen anstellen.

Nebenschlussmotoren erfordern »Anlasswiderstände«, eventuell »Umkehr-Anlasswiderstände«.

Digitized by Google

Die Fig. 48 zeigt die Einschaltung von Nebenschlussmotoren in die Leitung eines Dreileitersystems, wobei jedoch bemerkt wird, dass es in vielen Fällen vorteilhaft ist, den Anker mit der höheren, die Elektromagnete mit der niedrigeren Spannung zu betreiben, was natürlich nur bei einem Mehrleitersysteme ohne Kraftverluste möglich ist. Das Umkehren der Drehrichtung ist bei allen Elektromotoren höchst einfach zu bewirken.

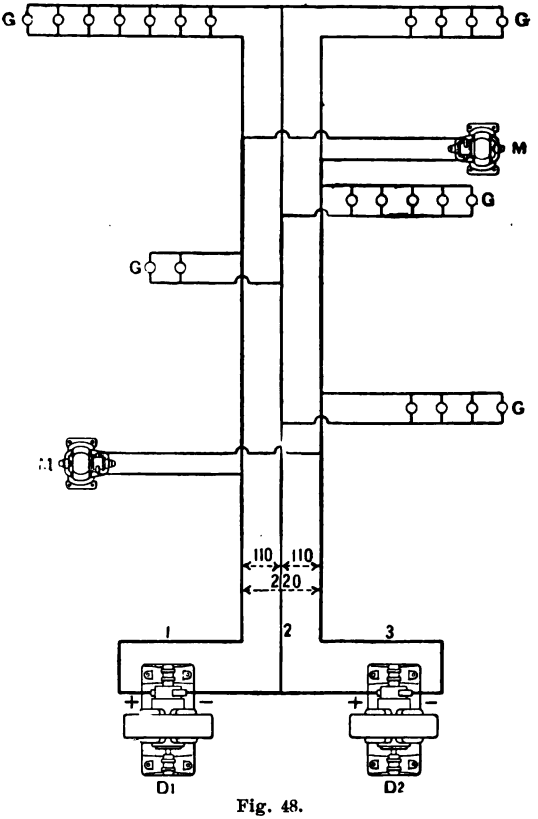


Fig. 48.

Bis zu 10 P. S. werden zweipolige Motoren verwendet. Bei grösseren Leistungen empfehlen sich mehrpolige Maschinen.

Für eine Anlage, bestehend aus Dynamo, Leitung und Motor, ist der Gesamtwirkungsgrad:

$$\Sigma\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$$

oder (bei Verwendung eines Nebenschlussmotors):

Digitized by Google

$$\Sigma\eta = \left(\frac{ei}{ei + \left[\left(i + \frac{e}{R_2}\right)^2 R_1 + e\frac{e}{R_2} + K\right]}\right) \left(\frac{e_2 i}{ei}\right) \left(\frac{ei + \left[\left(i + \frac{e}{R_2}\right)^2 R_1 + e\frac{e}{R_2} + K\right]}{ei}\right)$$

oder:

$$\Sigma\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \frac{ei - (eJ_0 + R_1 J_1^2)}{ei}.$$

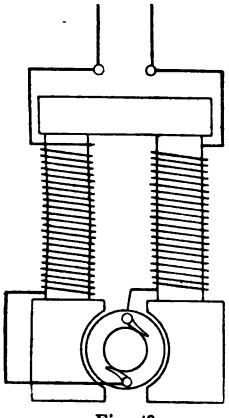


Fig. 49.

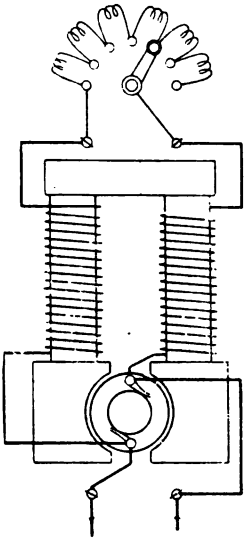


Fig. 51.

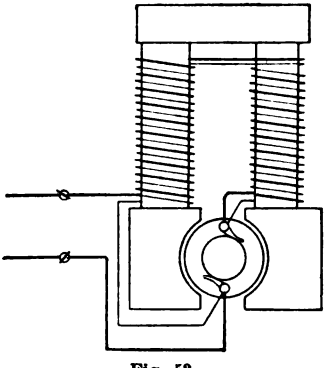


Fig. 53.

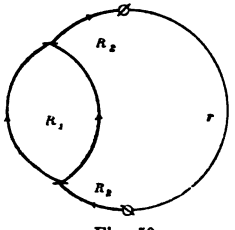


Fig. 50.

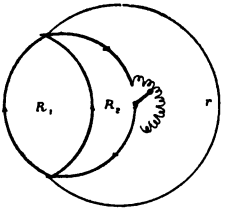


Fig. 52.

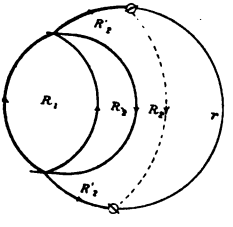


Fig. 54.

Alle Grössen dieser beiden Formeln sind einfach und leicht bestimmbar. Verzweigung des Netzes oder die Verwendung mehrerer Motoren und Kombinationen mit Bogen- und Glühlampen als Nutzwiderstände u. s. w. erfordern zwar ausgedehntere Rechnungen; die Genauigkeit derselben braucht aber durch den grösseren Umfang keine Beeinträchtigung zu erleiden — die Rechnungsfaktoren bleiben immer die gleichen.

Digitized by Google

Für Hauptstrom- und Compoundmaschinen stehen ähnliche, gleich einfache und gleiche sichere Formeln zur Verfügung; am einfachsten gestalten sich aber diese Formeln für den seltenen Fall der Verwendung magnetelektrischer oder besonders erregter Gleichstrommaschinen.

Es erübrigt noch, etwas über die Verwendbarkeit der verschieden geschalteten Gleichstromelektromotoren zu sagen:

Je nach der Beschaffenheit der Arbeit hat man nach folgenden Grundsätzen zu wählen:

Die Hauptstromschaltung (Fig. 49 und 50) ist dort anzuwenden, wo die Motoren mit voller Kraft angehen müssen und während der ganzen Betriebsdauer eine völlig gleichmässige Beanspruchung gesichert erscheint. Bei wechselnder Beanspruchung müsste eine ziemlich komplizierte Regulierung vorgesehen werden; denn bei jedem Wechsel wird die Tourenzahl des Motors eine Veränderung erleiden, und daher auch ein Wechsel der elektrischen Gegenkraft eintreten, was die Verhältnisse der Stromstärke und der davon direkt abhängigen magnetischen Felder ändert.

Die Nebenschlussschaltung (Fig. 51 und 52) ist wohl die am häufigsten angewendete. Sie gestattet eine ziemlich weit gehende Änderung der Tourenzahl und haben solche Änderungen auf die Verhältnisse im Hauptstromkreise nur einen sehr geringen Einfluss. Insbesondere bei der Parallelschaltung solcher Motoren mit elektrischen Lampen wird fast ausschliesslich Nebenschlussschaltung gewählt, weil nur dadurch die Nichtbeeinflussung des Lichtes und der anderen Motoren bei Ungleichmässigkeiten des einen Motors gewährleistet wird.

Die gemischte oder Compoundschaltung (Fig. 53 und 54) gewährt die Vorteile beider Schaltungsarten. Es wäre aber unrichtig, infolgedessen immer und unter allen Verhältnissen Compoundschaltung zu wählen, denn nicht in allen Fällen ist das kräftige Angehen der Motoren erwünscht. Bei Spinn-, Wirk- und Webstühlen für feine, zarte Fäden würde z. B. ein allzukräftiges Angehen der Motoren wohl viel Fadenbruch veranlassen.

Also: 1. Für starkes Angehen und gleichbleibende Leistungen: »Hauptstrom.«
2. Für langsames Angehen und wechselnde Beanspruchung: »Nebenschluss.«
3. Für kräftiges Angehen, aber wechselnde Beanspruchung: »Compound.«

Das sind die allgemeinen Gesichtspunkte zur Wahl der Schaltungsart für Gleichstrommotoren.

Digitized by Google

Besondere Erprobungen bei der Wahl für ganz bestimmte Zwecke werden aber kaum zu umgehen sein, wenn in der betreffenden elektrischen Fabrik, der die Ausführung übertragen werden soll, nicht schon Erfahrungen für den betreffenden Industriezweig vorliegen.

Bekanntlich kann der Wirkungsgrad nie gleich Eins sein, der Wert für η wird immer kleiner als 1 werden müssen.

Die A. E.-G. war die erste, welche darauf aufmerksam machte, dass es Fälle geben könne, bei welchen Leistung und Rückgewinn grösser werden kann als der Kraftaufwand.

Sie schreibt darüber ungefähr folgendes: Wenn z. B. bei der Beladung eines Schiffes der elektrische Kran die Last 0,5 *m* hoch vom Quai aufhebt, dann nach ausgeführter Winkelbewegung 10 *m* tief in den Schiffsraum sinken lässt, so wird die Last durch das Windewerk den Nebenschlussmotor mit zunehmender Geschwindigkeit drehen. Es verwandelt sich also der Motor in eine mechanisch angetriebene Maschine, also in eine Dynamo, welche als Bremse wirkt und die hierbei frei werdende Energie als elektrischen Strom an die Centrale zurückliefert.

Wir wollen ein bezügliches Beispiel aufstellen:

23. Beispiel. Ein elektrischer Kran soll beim Löschen die Last 1500 *kg* mit $v = 0{,}6$ *m* in der Sekunde vom Schiff aus 15 *m* hoch heben und nach der Drehung 4 *m* tief auf den Quai absetzen; beim Laden dagegen soll der umgekehrte Fall eintreten.

Wir müssen nun unterscheiden:

a) Bei dem Heben der vollen Last von 1500 *kg* wird der Motor theoretisch eine Leistung von $\frac{1500 \times 0{,}6}{75} = 12$ P. S. auszuführen haben.

Da der Wirkungsgrad des Windewerkes aber 0,81 beträgt, so erhöht sich die aufzuwendende Arbeit auf $\frac{12}{0{,}81} = 14{,}8$ P. S. Der Elektromotor hat bei Vollbelastung einen Wirkungsgrad von 0,87, d. h. er braucht $\frac{736}{0{,}87} = 846$ Watt für die P. S., demnach für 14,8 P. S. 12520 Watt.

b) Bei dem Senken der vollen Last von 1500 *kg* treibt diese Last zunächst das Windewerk, es bleiben also zum Antriebe der elektrischen Maschinen übrig $12 \times 0{,}79 = 9{,}5$ P. S. Denn der geringeren Belastung des Windewerkes wegen ist dessen Wirkungsgrad nur noch 0,79. Da hierbei ferner die elektrische Maschine etwa zu $^2/_3$ belastet ist, so geht ihr Wirkungsgrad auf 0,82 zurück, d. h. der Elektromotor giebt unter diesen Umständen als Dynamo 600 Watt für die P. S., und die Grösse des Rückstromes entspricht $9{,}5 \times 600 = 5700$ Watt.

c) Bei dem Heben der halben Last von 750 *kg* hat der Motor theoretisch zu leisten $\frac{750 \times 0{,}6}{12} = 6$ P. S. Infolge dieser kleineren Belastung ist der Wirkungsgrad des Windewerkes nur noch zu 0,74 anzunehmen; der Elektromotor muss also leisten $\frac{6}{0{,}75} = 8$ P. S. Hierbei braucht er, da sein eigener Wirkungsgrad

Digitized by Google

bei halber Belastung zu 0,78 einzusetzen ist, $\frac{736}{0,78} = 944$ Watt für die P. S.; im ganzen also $8 \times 944 = 7552$ Watt.

d) Bei dem Senken der halben Last von 750 *kg* treibt diese Last zunächst wiederum das Windewerk. Es verbleiben demnach unter der Annahme, dass der Wirkungsgrad des Windewerkes bei dieser noch kleineren Belastung nur noch 0,65 ist, zum Betriebe der elektrischen Maschine $6 \times 0,65 = 3,9$ P. S. Diese ist also mit 3,9 P. S., d. i. ca. $^1/_4$ der normalen Leistung, beansprucht und giebt dabei 515 Watt pro P. S., sodass bei halber Last die zurückgelieferte elektrische Energie $3,9 \times 515 = 2000$ Watt beträgt.

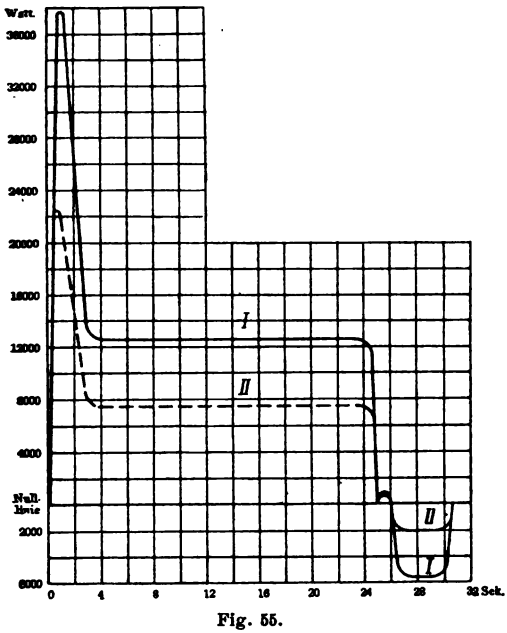


Fig. 55.

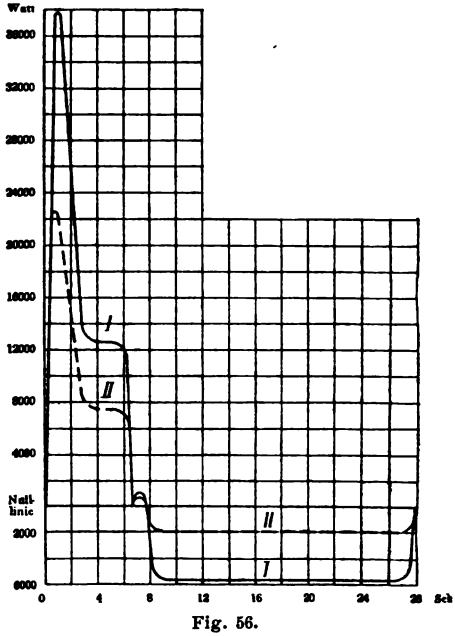


Fig. 56.

Bei 15 *m* Hubhöhe sind 25 Sekunden zum Heben der Last nötig; bei 4 *m* Hubhöhe 6,7 Sekunden. Beim Senken der Last, als Dynamomaschine läuft jedoch die elektrische Maschine erfahrungsgemäss um 15 % schneller, wie als Elektromotor, sodass hierbei die Zeit des Senkens bei 15 *m* Höhe 21,2 Sekunden beträgt, bei 4 *m* 5,7 Sekunden.

Nun ergiebt sich für den vorliegenden Fall folgendes: Beim Löschen mit voller Last beträgt die durch den Rückstrom zurückgewonnene Arbeit 6,5 % der geleisteten Arbeit. (Fig. 55, Kurve I.)

Beim Löschen mit halber Last 3,0 % (Kurve II, Fig. 55)
» Laden » voller » 83 » (» I, » 56)
» » » halber » 49,5 » (» II, » 56).

Bei der Annahme, dass sich die Arbeit des Löschens gleichmässig verteilt, ergiebt der Rückstrom bei voller Last von 1500 *kg* zu 27,1 %, bei halber Last zu 16,1 % des Arbeitsstromes.

Dass derartige Resultate auf den Kohlenverbrauch und zwar auf das Ersparnis an Heizmaterial höchst günstig einwirken, steht ausser allem Zweifel.

Digitized by Google

B. Wechselstrom und Drehstrom.

Wechselstromdynamos zur Erzeugung einfachen und mehrphasigen Wechselstromes giebt es in so vielfachen Konstruktionen, dass es unmöglich wäre, die bezüglichen Konstruktionselemente hier auch nur auszugsweise zu erörtern. Ein derartiges Beginnen hätte auch nicht viel Zweck, denn das Gebiet des Wechselstromes ist nicht gerade einfach, im Gegenteil — es bietet vorläufig noch so viele Schwierigkeiten, dass ein gründliches Verständnis nur nach eingehendem Studium erreicht werden kann.[1])

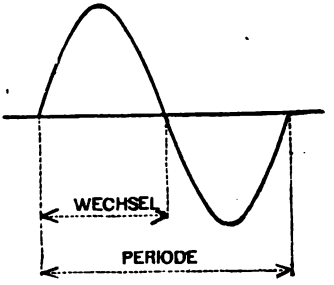


Fig. 57. Stromkurve für den einfachen Wechselstrom.

Wir bezeichnen einfach und zum Zwecke unserer Darstellungen genügend, »Wechselstromdynamos« als Elektrizitätsquellen, die uns elektrische Energie in Form einfachen (einphasigen) Wechselstromes oder in Form zweiphasigen oder dreiphasigen Drehstromes liefern.

Die Diagramme 57, 58 u. 59 zeigen uns Verlauf und Kombination der Stromkurven.

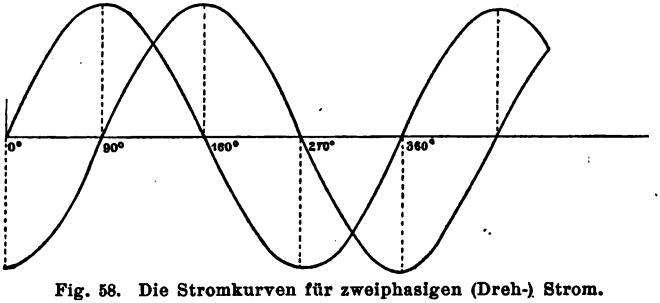


Fig. 58. Die Stromkurven für zweiphasigen (Dreh-) Strom.

Die Tabellen im Anhange geben Aufschluss, was auf diesem Gebiete von der elektrotechnischen Industrie geboten wird.

Die Motoren für Wechselstrom unterscheiden sich von den Gleichstrommotoren vor allem durch die besonderen Eigenschaften des magnetischen Feldes.

---

[1]) Zur Zeit, als die erste Auflage dieses Heftchens erschien, existierte im Buchhandel kein einziges Buch, das den mehrphasigen Wechselstrom (Drehstrom) behandelte. Seitdem ist gründlich Abhilfe geschaffen; wir haben jetzt eine erschöpfende Litteratur über Drehstrom und deswegen sind beschreibende Ausführungen über solche Maschinen hier nicht mehr nötig.

Digitized by Google

Es giebt 1. Wechselstrommotore mit konstantem Feld (magnetische Motore mit separater Erregung oder Selbsterregung

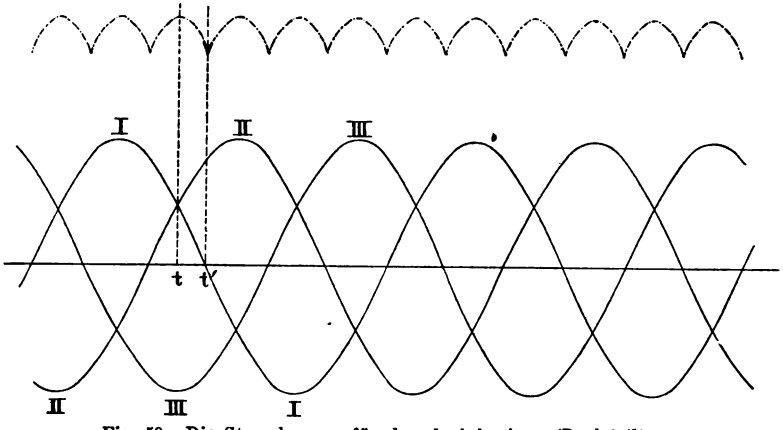


Fig. 59. Die Stromkurven für den dreiphasigen (Dreh-) Strom.

mit kommutiertem Wechsel- [bezw. Gleich-] strom; sodann 2. solche mit rotierendem Feld (sogenannte Drehstrommotore).

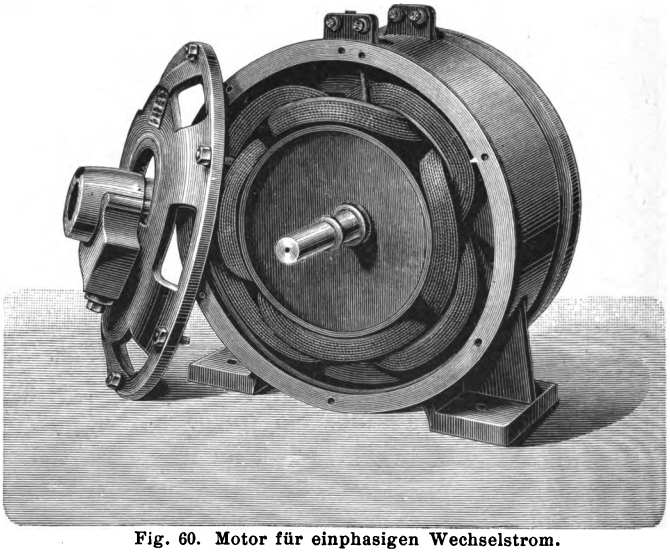


Fig. 60. Motor für einphasigen Wechselstrom.

ad 1. Wechselstrommotore mit konstantem Felde sind ähnlich wie die zugehörigen Stromerzeuger konstruiert. Sie laufen nur synchron, gehen mit Belastung nicht an und bleiben bei asynchroner Funktion und bei Überlastung stehen.

Digitized by Google

Die mittlere Leistung eines Gleichstrommotors ist $P = EJ$; die eines Wechselstrommotors:

$$P = \frac{E_{max}\, J_{max}}{2} \cos \varphi,$$

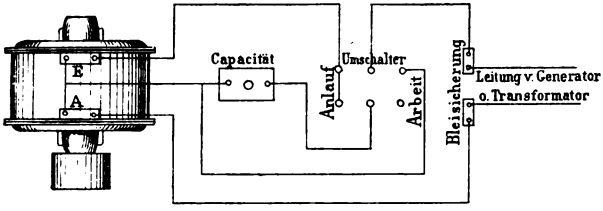


Fig. 61.

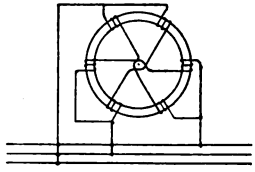


Fig. 62.

wobei φ der Phasenverschiebungswinkel zwischen E und J (siehe Seite 89) ist.

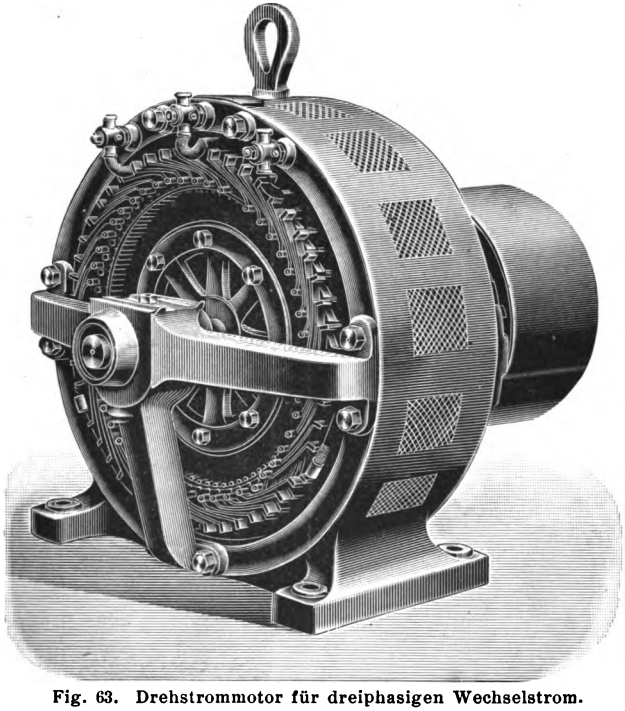


Fig. 63. Drehstrommotor für dreiphasigen Wechselstrom.

Bei gleicher Leistung und gleicher Spannung wird $J_{max} > J$ werden müssen, was dickere Drähte im Motor und bei den Zuleitungen erfordert.

Digitized by Google

Rein synchrone Motoren haben sich für die Praxis besonderen Wert nicht erringen können.

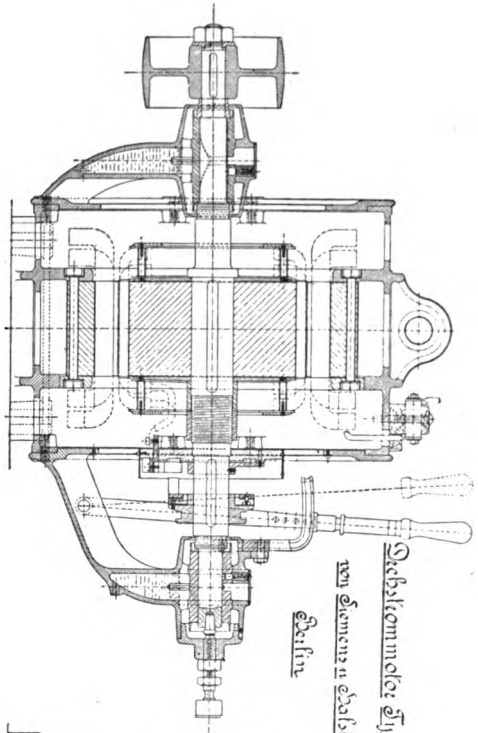


Fig. 64.

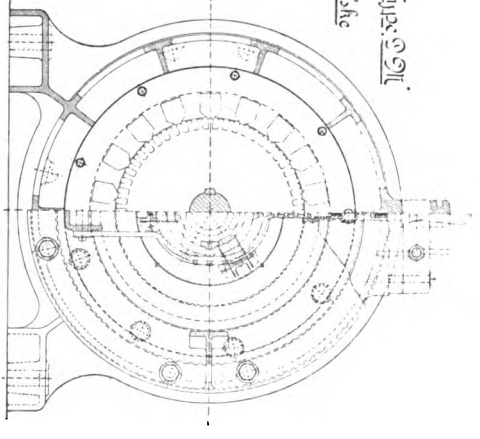


Fig. 65.

laufen, ein magnetisches Drehfeld erzeugt die Einschaltung eines Drehstrommotors.

ad 2. Dagegen haben Drehstrommotore, gleichviel ob sie mit einfachem Wechselstrom und Kunstphase oder mit mehrphasigem Wechselstrom betrieben werden, sich bestens bewährt, besonders wenn sie für asynchrone Funktion gebaut sind.

Ohne auf technische Beschreibungen weiter eingehen zu wollen, zeigt Fig. 60 einen asynchronen Wechselstrommotor von Brown Boveri & Co. und Fig. 61 die zugehörige Schaltung. Zweiphasenmotore sind sehr wenig verbreitet, sodass wir dieselben hier ganz ausser Acht lassen können.

Drehstrommotore für dreiphasigen Wechselstrom aber haben eine Bedeutung in der Elektrotechnik erlangt, dass es gerechtfertigt erscheint, dieselben auch hier etwas eingehender zu betrachten.

Es muss als bekannt vorausgesetzt werden, wie mittels Wechselströmen, die nach dem Diagramm Fig. 59 verwird. Die Fig. 62 zeigt Die beiden konzentrischen

Digitized by Google

Kreise bedeuten einen Eisenring, in welchem das Drehfeld kreist. Wird im so gebildeten Hohlraum ein Eisenkörper gelagert, so rotiert letzterer mit dem Felde. Ein solcher Eisenkörper trägt in seiner Oberfläche isolierte Kupferdrähte, die am besten ganz in den Eisenmantel eingebettet und einfach kurz geschlossen werden.

Die Fig. 63 zeigt einen solchen Drehstrommotor nach der Type der A. E.-G., die Fig. 64 und 65 den Schnitt durch einen Drehstrommotor von Siemens & Halske, A.-G., Berlin.

Bei solchen Motoren gilt die Relation:

$$\frac{n}{60} = \frac{\text{Wechsel}}{\text{Polzahl des Motors}}.$$

Die Wechselzahl wird zumeist auf 100 festgesetzt, sodass, da ein solcher Motor zwei-, vier-, sechs-, acht- u. s. w. polig sein kann, bei Leerlauf 3000, 1500, 1000, 750 u. s. w. Umdrehungen pro Minute leistet. Bei Vollbelastung verringern sich diese Umdrehungszahlen um ca. 5 bis 6 %. Änderungen der letzteren sind allerdings nur mittels mechanischer Mittel möglich.

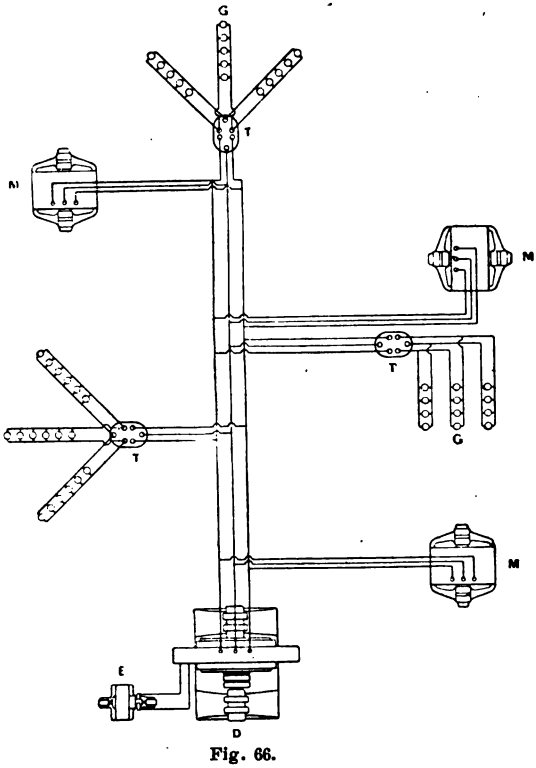


Fig. 66.

Auch bei Drehstromanlagen können Motore und Lampen (Glühlampen oder Wechselstrom-Bogenlampen) aus derselben Leitung gespeist werden; es empfiehlt sich aber doch, bei solchen Anlagen getrennte Schleifen für Motore und für Beleuchtung auszuführen. (Siehe Schaltungsschema, Fig. 66.) Es ist ferner möglich, mittels einfacher Umsteuerung die Motore entweder nach der einen oder der anderen Richtung laufen zu lassen.

Trotz der scheinbaren Kompliziertheit der Funktion solcher Motoren wird man finden, dass dieselben in ihrer Konstruktion bei gleichen Leistungen wesentlich einfacher als Gleichstrommotoren

Digitized by Google

gebaut sind, daher viel mehr Sicherheit im Betrieb bieten. Wie kompliziert ist die Wickelung eines Gleichstromankers, wie schwierig ist der Bau eines tadellosen Kollektors, und wie oft wird durch den Verschleiss des letzteren und der Stromabnehmer, und durch die unterlassene Regulierung dieser beiden funkengebenden Teile eine Betriebsunterbrechung veranlasst. Wie einfach und widerstandsfähig ist dagegen der im Drehstrommotor rotierende Eisencylinder samt seiner mechanisch unverrückbaren und kaum verletzbaren Bewickelung; Schleifkontakte fehlen bei den kleineren Motoren (bis 10 P. S.) gänzlich, also kann auch keine Funkenbildung auftreten, und es bedürfen die elektrischen und magnetischen Teile gar keiner Regulierung, noch Wartung. Die übrigen Teile, so der Eisenring, welcher das Drehfeld erregt, sind fix, also unbeweglich und ist eine Beschädigung dieser Teile wohl kaum denkbar.

Die dreiphasigen Drehstrommotore verhalten sich in der Funktion genau wie Gleichstrommotore; sie gehen belastet an, bleiben bei Überlast nicht stehen (da sie asynchron laufen) und arbeiten auch mit gleichem Wirkungsgrad.

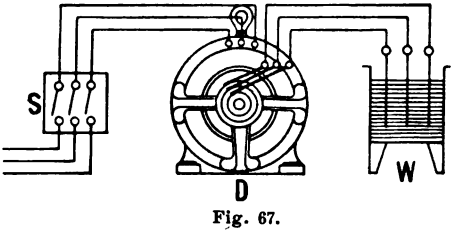


Fig. 67.

Bei grösseren Drehstrommotoren schaltet man in die Ankerwickelung (welche sonst im Kurzschluss steht) Widerstände ein, wie dies in Fig. 67 angedeutet ist.

Dies wird nötig, wenn in den Drähten des Kurzschlussankers so heftige Induktionswirkungen auftreten, dass deren Wärmewirkungen die Maschine beschädigen könnten. Durch das Einschalten der Widerstände werden solche Stromstärken vermindert und unschädlich gemacht.

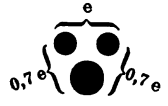
Bei der Wahl der Leitungen gilt der Grundsatz, dass jene Leitung die beste ist, bei der, gleiche Spannungen und Verluste vorausgesetzt, die kleinsten Kupfermengen nötig sind, oder bei denen, gleiche Spannungen und gleiche Drähte vorausgesetzt, mehr Energie mit dem gleichen Verlust übertragen werden kann.

Das Verhältnis der Drahtmengen bei gleicher Spannung *e*, gleicher Energie und gleichen Verlusten wird unter Voraussetzung derselben Entfernungen durch folgendes Zahlenbeispiel illustriert:

Digitized by Google

Einfacher Wechselstrom:
2 Drähte à 100 *qmm* = 200 *qmm* total.

Unverketteter Zweiphasenstrom:
4 Drähte à 50 *qmm* = 200 *qmm* total.



Zweiphasenstrom
mit gemeinsamer Rückleitung:
2 Drähte à 100 *qmm*
1 Draht à 140 *qmm* } zusammen = 340 *qmm*.

Verketteter Dreiphasenstrom:
3 Drähte à 50 *qmm* = 150 *qmm* total.

(Nach G. Kapp.)

Man darf ohne weiteres annehmen, dass für Drehstromleitungen 25 % weniger Kupfer nötig ist, als wie zu gleich langen Gleichstromleitungen zur Übertragung der gleichen Energie auf die gleiche Entfernung, wobei allerdings zu bemerken ist, dass dies nur auf kurze Entfernungen gilt, denn bei grossen Entfernungen (über 3 *km*) kommt Gleichstrom überhaupt nicht mehr in Betracht.

Die Querschnitte für Drehstromleitungen werden nach folgender Formel berechnet:

Bedeutet l die Länge einer Leitung in m;
A die primäre zur Verfügung stehend Energie in Watt;
γ die Leitfähigkeit des Metalls;
g den Wattverlust in %;
E die Haupt- (Betriebs- oder Netz-) Spannung;
e die Phasenspannung und
$\cos\varphi$ den Leistungsfaktor, dann ist:

$$q = \frac{100\, l\, A}{\gamma\, g\, E^2 \cos^2\varphi} = \frac{100\, l\, A}{3\, \gamma\, g\, e^2 \cos^2\varphi}.$$

Ist die am Verbrauchsort zur Verwendung gelangende Kraft A_2 bekannt, dann ist: $A = A_2 \dfrac{100}{100 - g}$.

Die hohen Spannungen (bis zu 30000 Volt) ermöglichen es heutzutage, Energie auf gewaltige Entfernungen zu übertragen. Nur die Isolation so hoher Spannungen bereitet Schwierigkeiten. Man wird die für jeden einzelnen Fall günstigste hohe Spannung zu ermitteln haben, unter Berücksichtigung der Norm: je höher die Spannung, desto geringer die Stromstärke, infolgedessen um so geringer die zur Leitung nötige Kupfermasse, wobei die Schwierigkeiten (Kosten) der Isolation als beschränkendes Moment auftreten.

Digitized by Google

Aus alledem wird klar, dass der Wirkungsgrad der Leitung eine Grösse ist, die man recht leicht regulieren und sicher derart einrichten kann, dass sie jener bei Gleichstromanlagen mindestens gleichkommt oder dieselbe auch an Vorteilen übertrifft.

Nicht vergessen darf man bei Wechselstrom- (Drehstrom-)leitungen auf die Wirkungen der »Selbstinduktion« und der elektrostatischen Kapazität. Die Selbstinduktion veranlasst einen scheinbaren Widerstand, sodass der Widerstand der Leitung grösser erscheint als der einfache Ohm'sche Widerstand. Diese Widerstandserhöhung hängt ab: 1. von der Wechselzahl; 2. von der Stromstärke; 3. von der Länge der Leitung; 4. vom Abstande der Hin- und Rückleitung; 5. von der Anordnung benachbarter Leitungen aus derselben Quelle.

Das sind von 1 bis 4 fast konstante Faktoren und zu 5 bemerken wir, dass es sich empfiehlt, möglichst die Anordnung zu treffen, dass in den benachbarten Leitungen negative Ströme zirkulieren, wenn in dem betreffenden Draht ein positiver Strom verläuft und umgekehrt, damit sich die erzeugten Kraftröhren aufheben und somit die Selbstinduktion bezw. der Spannungsabfall verringert wird.

Je höher die Betriebsspannung, desto geringer der induktive Spannungsabfall.

Infolge der fortwährenden Ladungen und Entladungen der Drähte bei Wechselstromanlagen entstehen infolge der elektrostatischen Kapazität »Ladeströme«, die aber in ihrer Phase um 90^0 gegen die Phase der Spannung verschoben sind, sodass zu ihrer Erzeugung keine Energie verbraucht wird und man dieselben als »wattlos« bezeichnen kann.

Unter solchen Umständen schadet die elektrostatische Kapazität nicht; sie kann aber immerhin in ihrem Verhältnis zum Ohm'schen und zum scheinbaren Widerstand, zur Selbstinduktion und zum induktiven Spannungsabfall Erscheinungen in Wechselstromanlagen veranlassen, die manchmal überraschen, oft stören, immer aber unangenehme Begleiterscheinungen bei solchen Anlagen bleiben.

Es erübrigt noch, über die Schaltungen beim Drehstrom einige Anhaltungspunkte zu geben:

Man unterscheidet:

1. Dreieckschaltung, auch geschlossene oder Parallelschaltung genannt (Fig. 68).

2. Sternschaltung, auch offene oder Hintereinanderschaltung genannt (Fig. 69).

Die Spannungsverhältnisse bei diesen beiden Schaltungsarten sind derart, dass zwischen a und b, b und c, c und a die Spannungen als gleichwertig angesehen werden können.

Digitized by Google

3. Die Sternschaltung mit Nullleitung (Fig. 70). Die Spannungen sind von *a* bis *b*, *b* bis *c* und *c* bis *a*

$$1{,}732 = \sqrt{3} \text{ mal so hoch}$$

als die Spannungen von *N* bis *a*, *N* bis *b* und *N* bis *c*.

Wenn z. B. zwischen *N* bis *a* 110 Volt (Phasenspannung) herrschen, dann erhalten wir zwischen *a* bis *b*, *b* bis *c* und *c* bis *a*

$$1{,}732 \times 110 = 190 \text{ Volt (Hauptspannung).}$$

Wechselstrom- u. Drehstromanlagen gestatten mittels der bekannten »Transformatoren« beliebige Spannungsänderungen in den einzelnen Teilen zu bewirken. Diese ausgezeichneten Hilfsmittel der Wechselstromtechnik arbeiten mit einem vorzüglichen Wirkungsgrad (ca. 0,94 bis 0,96).

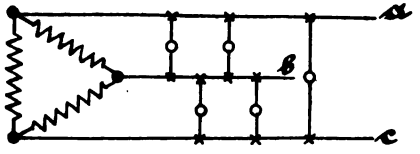


Fig. 68.

Das Laden der Akkumulatoren bietet zwar einige Komplikationen und verursacht Kraftverluste; unmöglich ist es aber nicht und nur die direkte Verwendung von solchen Kraftsammlern gleichzeitig mit Drehstrommaschinen ist noch nicht durchführbar.

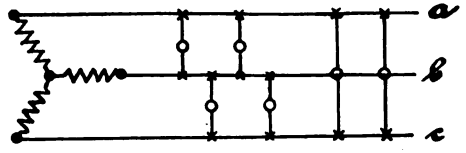


Fig. 69.

Überblicken wir das bis jetzt Gesagte, so ergeben sich für dreiphasige Drehstromanlagen folgende Vorzüge:

1. Die Drehstromdynamo und -Motore haben keine losen, schleifenden Kontakte mit Unterbrechung; sie laufen daher vollkommen funkenlos.

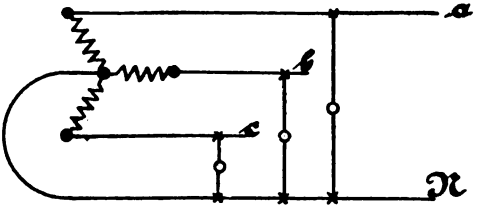


Fig. 70.

2. Da solche Maschinen gar keine kleinen beweglichen Teile haben, bedürfen sie auch gar keiner Regulierung noch Bedienung und es erwächst aus den elektrischen und magnetischen Vorgängen kein Verschleiss.

3. Es sind daher auch aus elektrischen und magnetischen Wirkungen keine Störungen zu fürchten, und

4. werden infolgedessen Drehstrommaschinen aller Art viel länger keiner Reparatur unterliegen als Gleichstrommaschinen.

Digitized by Google

5. Die Materialausnutzung ist beim dreiphasigen Drehstromsystem viel günstiger bei den Maschinen, als auch

6. besonders bei den Leitungen, bei welchen trotz der nötigen drei Leiter immer noch Kupfer erspart werden kann. Die Leitungen werden bei diesem System sogar wesentlich billiger, als selbst bei den Zweileitersystemen.

7. Der Spannungsabfall beträgt beim dreiphasigen Drehstrom nur ein Drittel des Abfalles bei einfachem Wechselstrom und zweiphasigem Drehstrom.

8. Dreiphasenstrom kann ebenso und nach denselben Gesetzen wie einfacher Wechselstrom transformiert werden, was demselben einen hervorragenden Vorzug gegenüber Gleichstrom gewährt.

9. Der Wirkungsgrad dreiphasiger Drehstromanlagen ist gleich dem Wirkungsgrad der Gleichstromanlagen.

10. Die Regulierung des Drehstromes bietet keine Schwierigkeiten, man hat dazu ausreichend erprobte Vorrichtungen.

11. Drehstrommotoren verursachen beim Betrieb wenig Kosten.

12. Man kann auch aus Drehstromanlagen gleichzeitig Licht und Kraft zu mechanischer Arbeit entnehmen.

Wir können nun daran gehen, die Frage zu erörtern:

Welches Strom-System soll bei elektrischen Kraftübertragungen gewählt werden?

Wir müssen dabei unterscheiden zwischen:

Kraftübertragung (auf grössere und grosse Entfernungen) und Kraftverteilung.

Bis zu 5 *km* Entfernung wird wohl immer das Gleichstromsystem mit Dreileitung, Akkumulatoren und 220 bis 440 Volt Betriebsspannung zu empfehlen sein; bei grösseren Entfernungen ist das Wechsel- oder ein Drehstromsystem vorzuziehen, und zwar besteht kein Zweifel mehr darüber, dass in diesem Fall dem dreiphasigen Drehstrom fast unter allen Verhältnissen der Vorrang gebührt.

Bei Anwendung des Gleichstromes hat man den grossen Vorteil der Aufspeicherungsfähigkeit des Stromes in Akkumulatoren und die selbstthätige Regulierung des Verbrauchstromes durch letztere; man ist aber in der Ausführung beschränkt, weil schon bei Entfernungen von über 1000 *m* so bedeutende Kupfermassen nötig sind, dass die Anschaffungskosten bei den jetzigen geringen Strompreisen kaum mehr amortisiert werden können. Gleichstrom bietet wieder anderseits Motore, deren Tourenzahlen innerhalb gewisser Grenzen regulierbar sind, und vorläufig ist, wenigstens in Europa, das Gleichstromsystem beim Publikum beliebter als jedes andere.

Digitized by Google

Die Art der Arbeitsmaschinen kann es allerdings wünschenswert erscheinen lassen, dass Motore mit bedeutender Anlaufkraft und gleichmässiger Umdrehungszahl zur Verwendung kommen; in diesem Fall wählt man ohne Rücksicht auf die Entfernung Drehstrom, weil nicht selten der Vorteil der billigeren Leitungen weniger wichtig ist als der Vorteil der passenderen Motore.

Gegen den gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstrom hatte man bislang infolge verschiedener Konkurrenzmanöver und wohl auch wegen einiger misslungener Ausführungen entschiedene Vorurteile, sodass die Entwickelung desselben verzögert wurde. Nunmehr aber, nach den günstigen Erfahrungen, die man damit gemacht hat, ist es nicht unwahrscheinlich, dass der Wechselstrom ein erfolgreicher Konkurrent des Gleichstromes geworden wäre, wenn nicht das Drehstromsystem beide überflügelt hätte. Dass Motore mit Wechselstrom belastet nicht angehen und bei Überlast stehen bleiben, sind Missstände, deren Behebung teilweise schon gelungen ist. Drehstrommotore arbeiten aber wie Gleichstrommotore, und daher sind sie den einfachen Wechselstrommotoren doch überlegen.

Überhaupt steht das Drehstromsystem bei Kraftübertragungen und Kraftverteilungen in erster Reihe und verdient, wie oben bewiesen wurde, auch diesen Vorzug.

Die Drehströme sind transformierbar und das ist ein ebenso wichtiger, wenn nicht noch grösserer Vorteil als die Aufspeicherbarkeit. Nur infolge der hohen Spannungen ist man imstande, Kraftübertragungen auf sehr grosse Entfernungen ökonomisch auszuführen; die übrigen Vorteile des Drehstromes (siehe S. 77) sind angenehme Beigaben.

Allerdings kann man die Tourenzahlen bei Drehstrommotoren direkt nicht ändern, das kann man aber bei mechanischen Transmissionen auch nicht.

Die oben gestellte Frage ist demnach und derzeit viel entschiedener zu Gunsten des Drehstromes zu beantworten, als zur Zeit des Erscheinens der ersten Auflage dieses Werkchens.

Gruppenantrieb — Einzelantrieb.

Es ist nunmehr genau präzisierbar, ob in bestimmten Fällen Gruppenantrieb oder Einzelantrieb mit Elektromotoren gewählt werden soll. Allgemein kann man sagen:

»Gruppenantrieb« empfiehlt sich bei kurzen, reichbesetzten Transmissionswellen, welche Kraft entweder in sehr geringen oder sehr bedeutenden Teilen abgeben müssen, wenn eine dauernde Arbeit für alle angehängten

Digitized by Google

Werkzeugmaschinen für voraussichtlich lange Zeit gesichert ist.

»Einzelantrieb« empfiehlt sich in allen Fällen, wo die Kraft über ein ausgebreitetes lokales Feld verteilt werden muss, wo die Inanspruchnahme der Werkmaschinen eine wechselnde ist und wo bei letzteren ungleichmässige Stillstände auftreten.

In dritter Reihe wäre dann noch als Hauptvorteil elektrischer Anlagen der Betrieb mit »transportablen Elektromotoren« zu erwähnen, welche ein so wesentliches Hilfsmittel moderner Fabriksbetriebe sind, dass sie gar nicht genug hervorgehoben werden können.

Welche Art des Betriebes nun für einen bestimmten Fabrikationszweig zu wählen ist, bleibt eine Sache eingehender Überlegung.

Nehmen wir an, es sei für irgend einen Fall, bei welchem es sich darum handelt, zu ermitteln, ob Gruppenantrieb oder Einzelantrieb günstigeren Wirkungsgrad ergiebt:

N die Anzahl der zu leistenden Pferdestärken,
t die mittlere Arbeitszeit während eines Arbeitstages
t_o die mittlere Zeit der Arbeitspausen während eines Arbeitstages,
L_g der Leerlauf bei Gruppenbetrieb,
L_e der Leerlauf bei Einzelbetrieb,

so ergiebt sich der Wirkungsgrad bei Gruppenbetrieb nach den Ausführungen der A. E.-G. zu:

$$\eta_g = \frac{N t}{N t + L_g (t + t_o)}$$

und der Wirkungsgrad bei Einzelbetrieb zu:

$$\eta_e = \frac{N t}{N t + L_e t}.$$

Um nun festzustellen, wann Gruppenbetrieb und wann Einzelbetrieb günstiger ist, sucht man zunächst den Grenzfall auf, für welchen beide Betriebsarten gleichwertig sind, d. h. den Fall, in welchem beide Wirkungsgrade η_g und η_e einander gleich sind. Es wird dann:

$$\frac{N t}{N t + L_g (t + t_o)} = \frac{N t}{N t + L_e t}$$

oder $$L_e t = L_g (t + t_o)$$

und $$\frac{L_e t}{L_g (t + t_o)} = 1.$$

Für die Bestimmung, welcher der beiden Wirkungsgrade der günstigere sei, ist nun dieses Verhältnis maassgebend und zwar wird

Digitized by Google

η_g günstiger, d. h. der Gruppenbetrieb ergiebt den besseren Wirkungsgrad, wenn:

$$\frac{L_e t}{L_g (t + t_o)} > 1.$$

Ist das Verhältnis gleich 1, so sind in Bezug auf den Wirkungsgrad, wie schon erwähnt, Gruppenbetrieb und Einzelbetrieb gleichwertig.

Ist dagegen

$$\frac{L_e t}{L_g (t + t_o)} < 1,$$

so ergiebt der Einzelbetrieb den günstigeren Wirkungsgrad.

Die obigen Gleichungen weisen gleichzeitig darauf hin, dass der Einzelbetrieb selbst dann noch günstiger sein kann als der Gruppenbetrieb, wenn der Wirkungsgrad der kleinen Motoren bei ersterem schlechter ist, als der Wirkungsgrad des einen grösseren Motors bei Gruppenbetrieb. Dieser Umstand ist hauptsächlich zurückzuführen auf die bei Gruppenbetrieb vorhandene, oft bedeutende Leerlaufarbeit.

Es ist hierbei jedoch zu bemerken, dass bei Auswahl der Betriebsart auch die Anlagekosten zu berücksichtigen sind, die für eine grössere Anzahl von Maschinen bei Einzelbetrieb sich meist höher stellen, als bei Gruppenbetrieb.

Trotzdem ist der Einzelbetrieb in den oben bezeichneten Fällen vorzuziehen, besonders seit der Drehstrommotor wegen des Fortfalles von Kommutator und Bürstenapparat die Möglichkeit bietet, auch eine grosse Anzahl kleiner und kleinster Motoren zweckmässig zum einzelnen Antreiben von Maschinen und Apparaten zu verwenden.

Die hier entwickelten Anschauungen gelten sowohl für Gleichstrom- wie für Wechsel- und Drehstromanlagen.

Soll bei einer Fabriks-Neuanlage mechanische oder elektrische Transmission eingerichtet werden?

Wie mechanische Krafttransmissionen mittels Wellen und Riemen eingerichtet sind, ist bekannt. Desgleichen muss hier die technische Anordnung, welche derzeit bei elektrischen Kraftübertragungen üblich ist, als bekannt vorausgesetzt werden. Wir haben z. B. eine elektrische Starkstromleitung mit einer Spannung von 220 Volt und zwar Gleichstrom. Wenn wir zwei von der Hauptleitung kommende Drahtanschlüsse zu einer Dynamomaschine führen, so wird die Armatur der letzteren nach Stromschluss zu rotieren beginnen, genau wie die Riemenschiebe eines Dampf- oder Gasmotors. Je mehr Ampère wir zuführen, desto bedeutender wird die Leistungsfähigkeit des Elektromotors, und wir können dieselbe steigern, bis uns die Erwärmung der Maschine eine Grenze setzt.

Digitized by Google

Wir haben den Wirkungsgrad der mechanischen zweistufigen Transmission mit 0,64 angesetzt. Ermitteln wir nun den Wirkungsgrad der elektrischen Transmission.

Bei der mechanischen Transmission wird die Kraft eines im Maschinenhause aufgestellten Dampf- oder Gasmotors mittels Riemen auf eine Welle übertragen, und von dieser die Kraft, die wir an einer bestimmten Stelle brauchen, mittels eines Riemens abgenommen. Dabei würden wir 36% der vom Dampf- oder Gasmotor oder der Turbine geleisteten Kraft verlieren.

Um denselben Effekt elektrisch zu erreichen, muss der mechanische Motor im Maschinenraum eine Primär-Dynamomaschine betreiben; die so erzeugte Energie wird mittels jener biegsamen, verhältnismässig dünnen Drähte bequem und ohne alle Schwierigkeit direkt an eine beliebige Stelle geleitet und betreibt hier einen Motor, der dieselbe Leistungsfähigkeit hat, als die etwa mit Riemen vom starren Gestänge abgenommene Kraft. Wie steht es aber mit den Kraftverlusten?

Die Primär-Dynamo arbeitet z. B. mit . . . . $\eta = 0{,}90$,
die Leitung müsste sehr unzureichend sein, wenn der
Wirkungsgrad geringer wäre als . . . . . $\eta = 0{,}98$.

Nehmen wir nun an, wir hätten einen recht kleinen Motor in Verwendung, etwa 1 P. S.; wenn dieser auch nur geringeren Wirkungsgrad hat, so können wir doch nicht weniger ansetzen als . . . . . $\eta = 0{,}73$.

Es ergiebt das einen

Gesamtwirkungsgrad von $0{,}90 \times 0{,}98 \times 0{,}73 = 0{,}64$.

Nach dieser Rechnung ist erwiesen, dass die Wirkungsgrade mechanischer und elektrischer Transmission völlig gleich sind, trotzdem wir immer zu Ungunsten der elektrischen Übertragung gerechnet haben. Die Rechnung stellt sich übrigens sofort anders, wenn wir die Stillstände der Maschine bezw. die nicht normalen Arbeitspausen in Betracht ziehen. Am besten wird sich das wieder an einem Beispiel erläutern lassen:

Eine 100pferdige Dampfmaschine leistet an den Werkmaschinen 64 P.S., den Rest von 36 P.S. verbraucht die mechanische Transmission. Diese letztere läuft jedoch durch die ganze Arbeitszeit, die wir mit 10 Stunden pro Tag ansetzen wollen. Bei Wirk- und Webfabriken rechnet man 30% Stillstände, das sind also pro Tag rund 3 Stunden, und von den durch die Transmission wirklich in Anspruch genommenen 360 Pferdekraftstunden werden 108 ohne direkten Nutzen verbraucht.

Bei der elektrischen Übertragung verbraucht die Transmission aber überhaupt nicht 360 Pferdekraftstunden, sondern nur 36×7

Digitized by Google

= 252, es werden demnach jeden Tag 108 Pferdekraftstunden erspart, was einen gewaltigen Einfluss auf den Materialverbrauch ausüben und schliesslich in der Jahresbilanz erfreulichen Ausdruck finden wird; denn die mechanische Transmission läuft während der Stillstände und beansprucht ihre 36 P.S., die elektrische Transmission aber — Einzelbetrieb vorausgesetzt — ruht während der Arbeitspausen und verbraucht also nichts.

Die Vergleichung der Wirkungsgrade mechanischer und elektrischer Übertragung.

I. Grenzwerte.

Wirkungsgrade bei	Mechanische Übertragung	Elektr. Übertragung	Ersparnisse durch elektrische Übertragung in %
2 Stufen und Vollbelastung	0,521 bis 0,710	0,73	28,6 bis 2,7
3 » » »	0,206 » 0,660	0,73	71,8 » 9,6
2 » » $^3/_4$ der »	0,465 » 0,645	0,70	32,6 » 7,9
2 » » $^2/_3$ der »	0,433 » 0,620	0,68	36,3 » 5,9

II. Mittelwerte.

Wirkungsgrade bei			
2 Stufen und Vollbelastung	0,644	0,730	11,8
3 » » »	0,490	0,730	32,9
2 » » $^3/_4$ der »	0,583	0,700	16,7
2 » » $^2/_3$ der »	0,553	0,680	18.7

(Bezüglich der Stufen siehe Bemerkung Seite 16.)

In einigen gut und rationell geleiteten Fabriken wurde übrigens beobachtet, dass bei elektrischer Transmission die Stillstände überhaupt geringer werden, dass also die Leistungsfähigkeit der Werkmaschinen durch Einführung des elektrischen Betriebes erhöht wird.

Es dürfte angezeigt sein, vorerst noch einige besondere Vorteile des elektrischen Betriebes aufzuzählen. Abgesehen von der Bequemlichkeit der Leitungsführung gegenüber der Anlage starrer Wellen, ist auch die Leichtbeweglichkeit der motorischen Kraft, deren lokale Anwendung nach Belieben unschwer verschoben werden kann, ein grosser Vorteil. Man muss ferner berücksichtigen, wie einfach bei den meisten elektrischen Motoren die Tourenzahl geändert werden kann, ohne komplizierte Auswechselungen oder Änderungen vornehmen zu müssen; und wie erwünscht es ist, für jeden einzelnen Fall der Arbeitsleistung die »beste Tourenzahl« wählen zu können, wovon man jetzt bei den gebräuchlichen mechanischen Transmissionen gar wenig spricht, weil einem solchen Verlangen zumeist grosse Schwierigkeiten gegenüber stehen würden.

Digitized by Google

Wenn wir nach alledem annehmen, dass die Wirkungsgrade mechanischer und elektrischer Transmissionen, rein technisch betrachtet, mindestens gleich sind, so wird durch Vorstehendes zweifellos und unanfechtbar erwiesen, dass der ökonomische Effekt von Werkmaschinen bei der Einführung elektrischer Transmission wesentlich steigt, und daher die Verwendung elektrischer Transmission bei Neuanlage von Fabriken unbedingt und überall angeraten werden kann.

Es ist aber Vorsicht geboten bei der Wahl, ob »Gruppenantrieb« oder »Einzelantrieb« eingerichtet werden soll; denn in dieser Beziehung ist schon viel gefehlt worden, was der guten Sache nicht zum Vorteil gereichte.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil liegt bei der Verwendung elektrischer Motore darin, dass die Leistung derselben jederzeit und ohne Schwierigkeit, ohne den Betrieb unterbrechen zu müssen, mit recht einfachen und billigen Apparaten gemessen werden kann.

Auch bei mechanischer Kraftübertragung kann man messen; wie wenig wird aber davon Gebrauch gemacht, weil die Einrichtungen nicht gerade einfach und auch nicht billig sind.

Im Gebiete der Arbeitsmessung standen wir bis jetzt überhaupt auf einem ganz merkwürdigen Standpunkt; es wird meistens nur »geschätzt«, wie es z. B. sehr zu seinem Schaden ein Kraftvermieter gethan hat, der in seiner Fabrik eine grössere Lokalität mit Wellentransmission einem anderen Industriellen mit der Vereinbarung überliess, dass 40 P. S. von der Haupttransmission abgenommen werden sollen. Erst bei der Einrichtung des elektrischen Betriebes, als im vermieteten Lokal ein 40 P. S.-Elektromotor bei weitem nicht ausreichte, um die normal besetzte Transmission zu ziehen, zeigte es sich, dass der Mieter mehr als 50 P. S. beanspruchte. Der Vermieter hat keinen Augenblick gezögert, anzuerkennen, dass dabei keine unlautere Absicht vorgelegen hat; man »hatte eben den Kraftbedarf geschätzt« und sich um mehr als 25 % geirrt. In jüngster Zeit sind übrigens viele derartige Fälle bekannt geworden.

Weitere theoretische Betrachtungen über den Wirkungsgrad bei Wechselstromanlagen.

Bezüglich der Wechselstrom-Anlagen ist man derzeit noch nicht so weit, als vorstehend für Gleichstrom erläutert wurde, und es dürfte angezeigt sein, hier die bezüglichen Verhältnisse derart zu beleuchten, dass ersichtlich wird, wo und wie angefangen werden muss, um auch auf diesem Gebiete jene Sicherheit in der Berechnung und Konstruktion zu erreichen, welche beim Gleichstrom eine zuverlässige Beherrschung der elektrischen Energie ermöglicht.

Digitized by Google

Gesetzt, es werde aus einer Gleichstrommaschine einfacher Wechselstrom nach der bekannten Schuckert'schen Konstruktion entnommen. Wenn die Gleichstromanordnung z. B. normal 123 Volt ergiebt, so erhält man bei der Wechselstromentnahme nur eff. 100 Volt. Das gilt so ziemlich allgemein, wenn der Polwinkel 90^0 (Fig. 71) beträgt. Bei einem grösseren Polwinkel kann ein und dieselbe Maschine 170 Volt bei Gleichstrom, und auch nur 100 Volt bei Wechselstromentnahme liefern.

Betrachtet man aber die Leistungen, so ist in solchen Fällen:

(Fig. 72) bei Gleichstrom . . . . . $L = 2ei$

(Fig. 73) bei Wechselstrom . . . . . $L = ei$.

Setzt man die bekannten Werte für e ein, so ist die Leistung

bei Gleichstrom $= 2\ Nz\,10^{-8}\,i$

bei Wechselstrom $= 2{,}22\ Nzp\,10^{-8}\,i$,

wobei N den Kraftfluss, z die Zahl der wirksamen Drähte und p die Zahl der Perioden des Wechselstromes bedeutet.

Theoretisch würde also beim Wechselstrombetrieb unter Berücksichtigung der Kapp'schen Konstante[1]) (2,22) bei gleichem Materiale ca. 11% mehr geleistet werden. Da jedoch bei den wirklich verwendeten Wechselstrommaschinen jene Konstante durchschnittlich mit 2 angesetzt wird, so ist wohl der Schluss gestattet, dass Wechselstrommaschinen caeteris paribus mit gleichem Wirkungsgrad wie Gleichstrommaschinen arbeiten können.

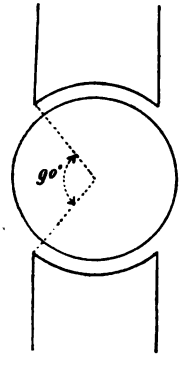


Fig. 71.

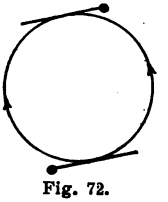


Fig. 72.

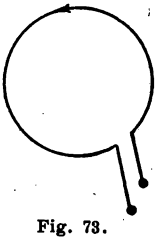


Fig. 73.

Zur Ermittelung und Aufstellung einer wohlbegründeten, präzisen und praktisch brauchbaren wissenschaftlichen Formel des Wirkungsgrades solcher Maschinen sind aber noch eine Menge von Vorarbeiten nötig, die im nachstehenden angedeutet werden sollen; diese Vorarbeiten sind nicht gerade einfach, sie komplizieren sich in ganz besonders ausgebreiteter Weise.

Beim Gleichstromsystem haben wir drei Grundtypen: Hauptstrom-, Nebenschluss- und Compoundmaschinen. Beim Wechselstrom dagegen müssen wir unterscheiden:

1. Maschinen mit cylindrischen Elektromagneten im Anker und im Felde.
2. Maschinen mit Wechselpolen, glatten Ankern mit aufgelegter Lagenwickelung.
3. Maschinen mit Wechselpolen und Lochankern.
4. Maschinen mit Gleichpolen, glatten Ankern und mit aufgelegter Lagenwickelung.
5. Maschinen mit Gleichpolen und Lochankern.
6. Maschinen mit Eisen im Anker.
7. Maschinen ohne Eisen im Anker.
8. Maschinen mit besonderer Erregung.
9. Maschinen mit Selbsterregung.
10. Maschinen mit gemischter Erregung.
11. Maschinen für einfachen Wechselstrom.
12. Maschinen für mehrphasige Wechselströme.

[1]) Wir nennen sie die »Kapp'sche Konstante«, weil wir diesem hervorragenden Konstrukteur auf diesem Gebiete die wertvollsten Veröffentlichungen verdanken.

Digitized by Google

Ausserdem ist zu berücksichtigen:

a) das Verhältnis der Polbreite zur Spulenbreite;
b) die Entfernung der Polmitten;
c) die relative Lage der Induktionsspulen zu den Erregerspulen;
d) die Periodenzahl ($p = 2n \times$ Polzahl);
e) die Anzahl der Ankerdrähte,

und schliesslich, aber als ein Hauptpunkt, ob induktionsfreie oder Objekte mit Selbstinduktion betrieben werden sollen.

Bei dieser Fülle von Grundtypen und bestimmenden Faktoren, in Berücksichtigung des Umstandes, dass viele dieser Typen sich noch im Entwickelungszustande befinden, ferner bei der kurzen Zeit, welche seit der intensiveren Anwendung und Bedeutung der Wechselstrommaschinen verflossen ist, kann es wohl nicht überraschen, dass bei der Zurückhaltung der Fabrikanten, welche das Experimentieren mit sehr grossen Maschinen begreiflicherweise nicht gern ermöglichen wollen noch können, die wissenschaftliche Feststellung der die Wirkungsgrade bestimmenden Faktoren nur wenig Fortschritte zu verzeichnen hat.

Bei fast allen oben aufgeführten Wechselstrommaschinen begnügte man sich mit mechanisch-dynamometrischen Messungen; bei Wechselstrommotoren verwendet man jene beliebte Methode, bei welcher dieselben eine Gleichstromdynamo von bekanntem Wirkungsgrad antreiben müssen, um Leistung und Kraftverbrauch zu bestimmen. Das reicht zwar vorläufig, befriedigt aber nicht! Es muss vielmehr angestrebt werden, auch bei Wechselstrommaschinen den Einfluss aller maassgebenden Konstruktionsfaktoren kennen zu lernen und in möglichst allgemein giltigen Formeln wenigstens so zu präzisieren, wie dies bei Gleichstrommaschinen bereits erreicht worden ist; es muss ermöglicht werden, aus einer Reihe leicht ermittelbarer, mechanischer oder elektrischer Dimensionen den Wirkungsgrad verlässlich vorausberechnen zu können.

Die Energieverluste kommen auch beim Wechselstrombetrieb zumeist durch den Spannungsabfall zum Ausdruck. Während dieser aber beim Gleichstrombetrieb nach genau bekannten Gesetzen erfolgt, ist dies beim Wechselstrom nicht immer der Fall (s. das Lauffener Phänomen); auch haben schon einige Wechselstromtechniker erklärt, dass sie sich durch das Ohm'sche Gesetz geniert fühlen.

Sicher ist, dass auch beim Wechselstromerzeugen der Spannungsabfall hauptsächlich

1. durch die Selbstinduktion und
2. durch die magnetisierende Wirkung der Ankerströme

veranlasst wird. Betrachten wir daher diese beiden Grössen.

I. Selbstinduktion.

Ist in Fig. 74 bei bestimmter Zeit t die Ampère-Windungszahl $J_t n$ und R die Reluktanz, dann ist der Kraftfluss:

$$N_t = \frac{J_t n}{R},$$

die elektromotorische Kraft:

$$E_a = \frac{d N}{d t} n$$

beziehentlich

$$= n \frac{d}{d t} (N \sin \alpha).$$

Digitized by Google

Nun ist $\frac{d\alpha}{dt}$ die Winkelgeschwindigkeit des Radiusvektor, und wir bezeichnen diese mit

$$\omega = 2\pi p,$$

sodass wir schreiben können:

$$E_a = n N 2\pi p \frac{d\alpha}{dt}$$

und daraus

$$= n N 2\pi p \cos\alpha \quad \ldots\ldots\ldots 1)$$

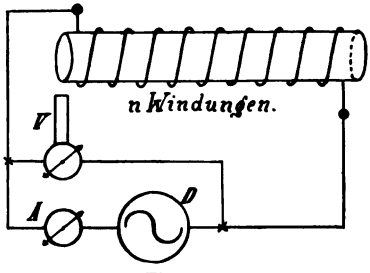


Fig. 74.

Zu dieser elektromotorischen Kraft tritt nun die Selbstinduktion als entgegenwirkende Kraft auf und da diese fast unter den gleichen Bedingungen wie E_a entsteht, so können wir als gewiss schreiben:

$$E_s \max = n N 2\pi p,$$

und den obigen Wert für N_t eingesetzt:

$$E_s \max = 2\pi p \frac{n^2 J}{R} \quad \ldots\ldots\ldots 2)$$

Nun ist aber die Reluktanz R (der magnetische Widerstand)

$$R = \Sigma \frac{l}{\mu A 4\pi}$$

(l die Länge in cm, A die Querschnittsfläche in qcm)

und es ist

$$\frac{n^2}{R} = n^2 \Sigma \frac{\mu A 4\pi}{l} = L.$$

Formel 2 wird jetzt umgewandelt in:

$$E_s = 2\pi p L J \text{ (absolut)}$$

$$= 2\pi p L \frac{J}{10} 10^{-8}$$

$$= 2\pi p L J 10^{-9} \text{ (Volt)} \quad \ldots\ldots\ldots 3)$$

und der Selbstinduktionskoëffizient

$$L = n^2 \mu \frac{4\pi A}{l} 10^{-9} \text{ (Henry)} \quad \ldots\ldots\ldots 4)$$

24. Beispiel: Es sei $A = 100\ qcm$, $l = 200\ cm$, $n = 70$, $p = 50$, $\mu = 2300$, dann ist bei $J = 3$ Ampère:

$$L = \frac{4 \times 3{,}14 \times 100}{200} \times 70^2 \times 2300 \times 10^{-9} = 0{,}07$$

und

$$E_s = 2 \times 3{,}14 \times 50 \times 0{,}07 \times 3 = \sim 66 \text{ Volt.}$$

Digitized by Google

Das ist scheinbar einfach. Die Komplikation zeigt sich aber sofort, wenn wir berücksichtigen, dass nach der Formel 3) die variable Stromstärke auf den Wert von E_s einen ganz besonders starken Einfluss ausübt, und wenn wir nur die Grenzen von $J_{max} : J_{eff}$ (Verhältnis $\sqrt{2} : 1$) und die dabei auftretenden Verschiedenheiten und Verhältnisse in Betracht ziehen, so erhellt, dass die Ermittelung von L und E_s bei Wechselstrommaschinen keine einfache Sache ist. Immerhin geben aber diese Betrachtungen wertvolle Anhaltspunkte.

Um die Selbstinduktion eines Ankers zu berechnen, bedient man sich der Formel:

$$J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

worin R der Ohm'sche Widerstand des Ankers, $\omega = 2\pi$ mal Frequenz und L der Selbstinduktionskoëffizient ist. Alle Grössen ausser L können als bekannt oder leicht ermittelbar angesehen werden, L ist daher aus dieser Formel ohne Schwierigkeit zu berechnen.

Die eigentliche Konstruktionsgleichung für Wechselstrommaschinen lautet so ziemlich für alle Fälle:

die scheinbaren Watt $ei = CvAp$ . . . . . 5)

in welcher v die Umfangsgeschwindigkeit in m pro Sekunde,
A die Polfläche in qcm,
p die Zahl der Polpaare bedeutet.

Die Konstante C ist bei:

a) einfachen Wechselstrommaschinen 0,5 bis 0,8;
b) Drehstrommaschinen (dreiphasigen) 0,7 bis 1,0.

Je kleiner die Maschine, desto kleiner der Wert für C.

II. Die Magnetisierung durch den Ankerstrom.

Eine Theorie dieser Wirkung bei Wechselströmen aufzustellen, dürfte vielleicht auf rein analytischem Wege möglich sein; physikalisch aber wäre vorläufig bei der Unzahl von Typen und Möglichkeiten jede Bemühung aussichtslos; zu letzterem Zwecke sind denn doch noch allzuviele Vorfragen experimentell zu lösen.

Zu beachten ist vorläufig folgendes: Der in den Windungen des Ankers induzierte elektrische Strom erzeugt einen Kraftfluss, welcher dem Hauptkraftfluss entgegenströmt, sodass eine Resultierende auftritt, deren Bestimmung bei Gleichstrom leicht ist und selbst beim Wechselstrom dann nicht besonders schwierig wäre, wenn letzterer der idealen Sinuskurve entsprechen würde; so ist aber der Ankerstrom eine ebenso variable, als in seinem Verlauf unregelmässige Grösse, und diese Unregelmässigkeit der Stromkurve erschwert die theoretischen Arbeiten.

Bezeichnen wir das Stromvolumen pro Loch $2qi$ mit Da, so ist das erzeugte Gegenfeld

$$N_g = \frac{Da}{R}.$$

Ist D der magnetomotorische Hauptdruck, so besteht für den ungünstigsten Fall die Relation

$$N_g = N \frac{Da}{D}.$$

Zwischen diesem und dem günstigsten Wert, d. i.

$$N_g = \text{Null}$$

sind nun derzeit Annahmen unerlässlich.

Digitized by Google

Der Kraftfluss N_g wird veranlasst durch Ampèrewindungen, die wir auch bei den Wechselstrommaschinen teils auf die im Felde liegenden Eisenmassen, teils auf die zu überwindenden Lufträume beziehen müssen.

Es ist nicht bekannt geworden, ob die Messung solcher Beziehungen an Wechselstrommaschinen thatsächlich und mit Erfolg ausgeführt worden sind. Mit konstanten Verhältnissen der Stromstärke, also mit Gleichstrom, an Wechselstrommaschinen versuchte und durchgeführte Experimente haben ergeben, dass das erzeugte Gegenfeld annähernd direkt proportional ist dem Sinus des Winkels (α), welcher von Polmitte zur Ankerlochmitte gemessen wird, sodass sich die obige Formel ergänzt zu

$$N_g = N \frac{D_a}{D} \sin \alpha.$$

Setzt man den Wert für D_a ein, so erhält man

$$N_g = N \frac{2\,q\,i}{D} \sin \alpha,$$

worin D und $2q$ als konstant anzusehen sind, sodass wir (Gleichstrom vorausgesetzt) eine Konstante

$$C = \frac{2\,q}{R}$$

einführen können und schliesslich

$$N_g = C i \sin \alpha$$

erhalten.

Dieses Gegenfeld erzeugt aber auch eine elektromotorische Gegenkraft (E_g) und wir können für dieselbe setzen:

$$E_g = E_a \left(0{,}7 \frac{D_a}{D} \sin \varphi\right)$$

bezw.

$$e_g = E_g \sin \varphi,$$

Das nebenstehende Diagramm (Fig. 75) zeigt uns den Weg der graphischen Methode, mittels welcher auch im Wechselstromgebiet recht Erspriessliches geleistet werden kann.

Es ist dabei

$\overline{OA} = E_a$,

$\overline{OK}$ = der thatsächlichen Klemmenspannung.

E_s und E_g sind die elektromotorischen Kräfte der Selbstinduktion und der Ankerstrom-Reaktion.

$\overline{KM}$ bezeichnet den Wert der sonstigen Energie-Verluste.

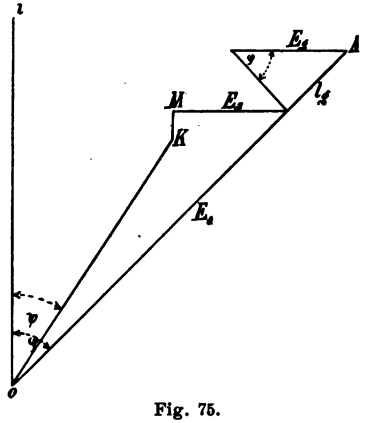


Fig. 75.

III. Die Phasenverschiebung zwischen E und J.

Selbstinduktion und Ankerstrommagnetisierung sind zwei auch beim Gleichstrom auftretende störende Faktoren; über dieselben haben wir schon seit langer Zeit die nötigen Grundbegriffe, und — wie wir annehmen — richtige Anschauungen, mit denen wir nun im Gebiete des Wechselstromes weiter arbeiten können.

Digitized by Google

Weniger allgemein sind die Anschauungen über die Einflüsse der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom, bezw. über jene Spannungsverminderung, die wir den »induktiven Spannungsabfall« nennen.

Die Phasenverschiebung, d. i. die Grösse des Zeitphasenunterschiedes zwischen E und J, welche beim Wechselstrombetrieb hier und da auftritt, ist

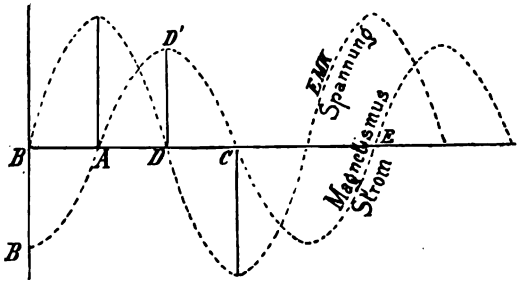


Fig. 76.

von der Grösse der von den eingeschalteten Apparaten und Maschinen erzeugten Gegenwirkung abhängig, und es kann theoretisch die Phasendifferenz zwischen jenen beiden Grössen $^1/_4$ Periode (= 90°) werden. Letzteres erfolgt bei der grössten Induktionsspannung, und diese wird bei der grössten Stromänderung d. i. wenn der Strom durch Null geht, erregt (Fig. 76).

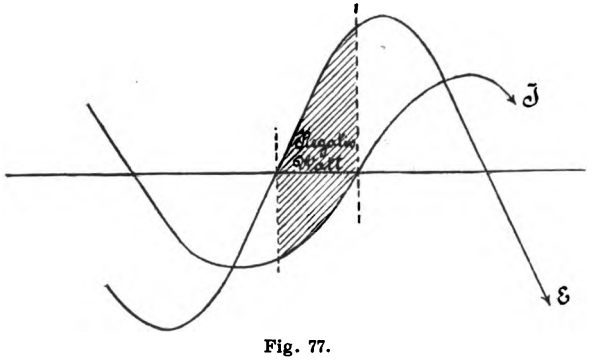


Fig. 77.

Wird in einem Stromkreise mit Phasenverschiebung die Spannung in den einzelnen Momenten mit der diesen Zeitmomenten entsprechenden Stromstärke multipliziert (Fig. 77) und findet man, dass die so ermittelten Watt nicht während der ganzen Periode positiv sind, sondern sich, je nachdem der $\measuredangle \varphi$ grösser oder kleiner wird, verändern, so dass ein grösserer oder kleinerer Teil der Watt negativ erscheint, so heisst das: die Stromquelle wird nicht während der ganzen Periode Energie liefern, sondern teilweise auch Energie empfangen.

Besteht in einem Wechselstromkreise zwischen E und J ein Phasenunterschied, so ist die geleistete bezw. aufgewendete Arbeit nicht gleich den »scheinbaren« Watt, d. i. $M(J) \times M(E)$, sie ist vielmehr gleich

$$M(J) \times M(E) \times \cos \varphi.$$

Digitized by Google

Ist der Cosinus des Phasenverschiebungswinkels φ bekannt, so können die Watt leicht graphisch ermittelt werden. Sind die scheinbaren und die wirklichen Watt gemessen, dann ist auch der $\sphericalangle \varphi$ graphisch darstellbar u. z. nach den Diagrammen (Fig. 78 und 79).

Die »wirklichen Watt« werden mit dem Wattmeter, der Phasenverschiebungswinkel mit dem Phasometer (Leerstrommesser) ermittelt.

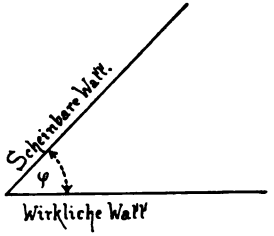


Fig. 78.

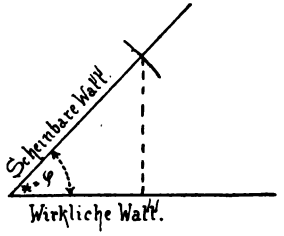


Fig. 79.

Aus Fig. 76 ergiebt sich ferner, dass der um 90° gegen die Spannung verschobene Strom keine geleistete Arbeit repräsentiert, sondern ausschliesslich eine oscillierende Energie, da er von Null bis zur Zeit $\frac{T}{2}$ mit seiner Spannung gegen die Hauptspannung entgegengesetztes Vorzeichen besitzt. Man hat dafür den Ausdruck »Wattloser Strom« (eine Contradictio in adjecto) gewählt; derselbe wird nichts anderes als die Magnetisierung besorgen und daher auch (viel besser) »Erregerstrom« genannt. Das Diagramm (Fig. 80) zeigt die bezüglichen Verhältnisse.

25. Beispiel (nach Dobrowolsky). An den Klemmen eines Elektromagneten herrschen 100 Volt; der Widerstand der Wickelung = 0,1 Ohm; die Gesamtstromstärke = 10 A. Wattverbrauch im Eisen durch Hysteresis und Wirbelströme = 140 Watt; Wattverlust im Kupfer = 10 Watt; dann ist der Wattstrom = 1,5 A., der resultierende Strom 10 A., der $\sphericalangle \varphi = 81^0$, und das Diagramm ergiebt ~ 9,9 A. Erregerstrom. Der Elektromagnet sei ringförmig.

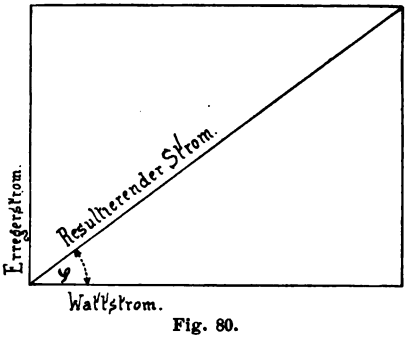


Fig. 80.

Ein Schnitt in diesen Ring verursacht die Einschaltung eines Luftwiderstandes für den magnetischen Kreis; und falls dadurch der Widerstand des letzteren verdoppelt wird, sind nicht mehr 9,9 sondern 19,8 Ampère nötig, um gleiche Wirkungen zu erzielen. Der Konsum im Kupfer wird jetzt statt 10 Watt, circa 40 Watt betragen, da der Strom nunmehr rund 20 A. sein wird. Der durch die grössere Stromstärke verursachte Spannungsverlust veranlasst jetzt ein Sinken des Magnetismus gegen den früheren um circa 1%. Es ergeben sich dann annähernd 138 Watt Verlust im Eisen und 40 Watt Verlust im Kupfer; zusammen 178 Watt, was bei 100 Volt circa 1,78 Ampère Wattstrom repräsentiert. Bilden wir damit wieder das Diagramm, so zeigt der resultierende Strom einen Wert von 20,6 A. und die Phasenverschiebung ist jetzt nur 8°. Den

Digitized by Google

resultierenden Strom können wir demnach leicht berechnen, wenn wir den magnetischen Widerstand und somit die Ampèrewindungen (bezw. den Erregerstrom), ferner die Verluste im Apparat (den Wattstrom) bestimmt haben.

Nehmen wir an, eine Wechselstrom-Dynamo liefert an den Klemmen 100 Volt und wir entnehmen derselben dabei 100 Ampère zum Glühlampenbetrieb. Entnehmen wir derselben Maschine statt der 100 A. für Glühlampen, 100 A. zum Elektromotorenbetrieb, dann wird die Spannung wesentlich zurückgehen, denn beim Glühlampenbetrieb ist $\cos \varphi$ nahezu $= 1$, während beim Betrieb von Elektromotoren infolge der nunmehr eingeschalteten vielen Multiplikationsspulen eine bedeutende Selbstinduktion auftritt, was induktiven Spannungsabfall veranlasst, und der Wert für $\cos \varphi$ wird von 1 auf einen Wert kleiner als 1 $\begin{pmatrix} \text{bis} \sim 0{,}7 \\ \text{und} \sim 0{,}5 \end{pmatrix}$ sinken.

Mit Bezug auf die Verwendung des Wechselstromes ist ferner zu unterscheiden zwischen den arithmetischen und geometrischen Mittelwerten des Stromes. Wird die Stromkurve spitzer als die ideale Sinuskurve, so werden auch die geometrischen Mittelwerte $\left(\sqrt{\frac{J^2}{2}}\right)$ grösser als die arithmetischen.

Bei der Verwendung von Wechselströmen zu elektrolytischen Zwecken entspricht der erhaltene Niederschlag dem arithmetischen Mittel aus den verschiedenen Stromstärken (nach der Kurve berechnet); bei allen anderen Zwecken gilt das geometrische Mittel.

Man sieht aus alledem, dass sich die theoretische Ermittelung des Wirkungsgrades einer Wechselstromanlage schon bei den Dynamos ganz bedeutend kompliziert; die verwickelten Verhältnisse der Selbstinduktion, die so sehr schwankenden Rückwirkungen des Ankerstromes, der induktive Spannungsabfall infolge der Phasenschiebung, bieten schon beim einfachen Wechselstrom eine Fülle von derzeit noch nicht behobenen Schwierigkeiten; diese verdoppeln und verdreifachen sich aber, wenn man mit zwei oder mehrphasigen Wechselströmen zu arbeiten beabsichtigt.

Im Gebiete der Wechselstrommotoren erfreuen wir uns einer Menge von theoretischen Arbeiten und obwohl (bei einer geringeren Anzahl von Typen) die Verhältnisse infolge des Umstandes, dass die Konstruktionsfaktoren viel weniger scharf, als bei den Wechselstromdynamos ausgeprägt sind, noch viel verwickelter erscheinen, ist doch auf eine Reihe von Erfolgen wissenschaftlicher Bestrebungen hinzuweisen, welche der Praxis in eminenter Weise zu Gute kommen.

Zu unterscheiden sind: a) synchrone, b) asynchrone; ferner 1. einphasige, 2. zweiphasige und 3. mehrphasige Wechselstrommotoren.

Bei Gleichstrommotoren steigt der Wirkungsgrad mit der Belastung. Das ist im allgemeinen bei Wechselstrommotoren auch so; nur tritt bei letzteren der »Wirkungsgrad des Anlaufes« mit in die Rechnung als ein nicht zu vernachlässigender und höchst wichtiger Konstruktionsfaktor.[1]) Im übrigen entspricht auch hier der Wirkungsgrad der Formel:

$$\eta_2 = \frac{\text{Wattleistung} = 1}{1 + \text{Wattverlust} \begin{cases} \text{im Kupfer der Feldwickelung,} \\ \text{» » » Ankerwickelung,} \\ \text{durch Hysteresis, Wirbelströme,} \\ \text{Lager und Luftreibung.} \end{cases}}$$

[1]) Auch bei Gleichstrommotoren erhebt sich die Stromkurve beim Anlauf zu einer oft recht bedeutenden Spitze. Es genügt aber zumeist, bei Kraftberechnungen 2% der Gesamtkraft zuzuschlagen, um den maximalen Kraftbedarf festzustellen.

Digitized by Google

Zuerst hat Dr. Schilling in Wien der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften (1892) eine interessante Abhandlung über die Theorie der Drehstrommotoren unterbreitet.

Die von ihm abgeleitete Formel des Wirkungsgrades $\left(\frac{1}{c+\frac{d}{k^2}}\right)$ enthält aber so viele nicht ausreichend bestimmte Konstanten, dass der Wert dieser Formel für den Praktiker gering sein dürfte.

Weitergehende und gelungenere Errungenschaften verdanken wir Herrn Prof. E. Arnold (1894), welcher die viel handlicheren Formeln aufstellte:

a) für einfache, asynchrone Wechselstrommotoren:

$$\eta_2 = \frac{W}{W_1} = \frac{W}{R_1 J_1^2 + W + W_2} = \frac{p_2 (Dp - Dn)}{R_1 J_1^2 + p_1 (Dp + Dn)},$$

worin Dpositiv und Dnegativ die beiden fiktiven Drehfelder bedeutet (jedes entsprechend einer Stromstärke $\frac{J}{2}$), von denen relativ zu den Windungen des Ankers das eine mit der Winkelgeschwindigkeit $p_1 - p_2$ in der Richtung der Rotation des Ankers, und das andere mit der Geschwindigkeit $p_1 + p_2$ entgegengesetzt zu dieser Richtung rotiert.

b) für asynchrone Drehstrommotoren gilt ungefähr dieselbe Formel, nur wird in diesem Falle Dn = Null, also

$$\eta_2 = \frac{p_2 D_p}{J_1^2 R + p_1 D_p}.$$

Ist der Wert für $J_1^2 R$ zu vernachlässigen, so wird

$$\eta_2 = \frac{p_2}{p_1},$$

d. h. der Wirkungsgrad eines Drehstrommotors ist gleich dem Verhältnisse der Winkelgeschwindigkeit des Ankers zu demjenigen des Drehfeldes.

Herr Cahen erweiterte[1]) die letztere Formel auf

$$\eta_2 = \frac{p_2}{p_1} \times \frac{W_1 - J_1^2 r_1 - H}{W_1}.$$

(J_1 = Stromstärke im Erregersystem; r_1 = Widerstand einer Spule des Erregersystems; W_1 = die dem Motor zugeführte Wattleistung; H = Hysteresis. p_1 und p_2 sind leicht zu ermitteln.)

Mit Hilfe eines Watt- und eines Ampèremeters wird man also bei ausgeführten Motoren, wenigstens in bestimmten Fällen, den Wirkungsgrad bestimmen können; denn H braucht — in praktischen Fällen — nur annähernd bekannt zu sein.

Vergleicht man die letzte Formel mit jenen auf Seite 58, so erscheint die Behauptung gerechtfertigt, dass wir bezüglich der Wirkungsgradberechnung für Elektromotoren im Wechselstromgebiet, vom Wirkungsgrad des Anlaufes abgesehen, auf ungefähr derselben Stufe stehen wie im Gleichstromgebiete, wenn auch zugestanden werden muss, dass im letzteren die Verhältnisse immer noch viel günstiger liegen und reichere Erfahrungen zu Gebote stehen.

---

[1]) E.T.Z. 1895, Heft 4, S. 52.

Digitized by Google

Auch bezüglich »der Leitung« herrschen beim Wechselstrombetrieb nicht jene einfachen und klaren Verhältnisse wie beim Gleichstrom.[1]) Es gilt zwar beim einfach geschlossenen Stromkreis für jedes Zeitelement die Ohm'sche Relation:

$$E = JR \sin \omega t,$$

aber nur, wenn im Stromkreis keine Selbstinduktion auftritt, d. i. also im äusserst seltenen Fall, dass die Phase des Stromes mit jener der Spannung zusammenfällt.

(ω ist gleich der Winkelgeschwindigkeit $\frac{d\varphi}{dt}$, J die Amplitude der Stromstärke.)

Sobald jedoch Selbstinduktion auftritt oder Leitungsverzweigungen vorgenommen werden, ändern sich die Verhältnisse wesentlich, und E muss geteilt betrachtet werden als:

$e_1 = JR \sin \omega t$ zur Erzeugung des Nutzstroms,

$e_2 = -L \frac{dJ}{dt}$ zur Überwindung der Selbstinduktion.

Nun ist aber $e_2 = -LJ\omega \cos \omega t$,

weil $\frac{dJ}{dt} = J\omega \cos \omega t$,

daher $E_s = -e_2 = LJ\omega \cos \omega t$

und, wie schon erläutert,

$$E = e_1 + E_s.$$

Das nebenstehende Diagramm, Fig. 81, zeigt die Kurven von e_1, e_2, E_s und E.

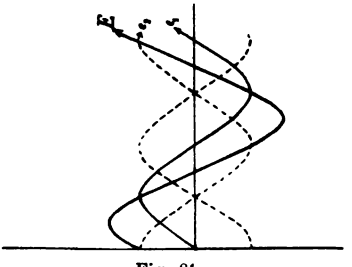


Fig. 81.

Wir können nun setzen:

$$E = e_1 + E_s = JR \sin \omega t + LJ\omega \cos \omega t$$

$$= JR(\sin \omega t + \frac{\omega L}{R} \cos \omega t)$$

und aus dieser Gleichung erhalten wir schliesslich:

$$E = J\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Wir bezeichnen jetzt mit ωL den sogenannten »induktiven Widerstand« (Induktanz, Reaktanz), mit dem Ausdruck $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ den »scheinbaren Wider-

[1]) Siehe diesbezüglich E.T.Z. 1897, Heft 44 S. 930, und Heft 48, S. 1019.

Digitized by Google

stand« (Impedanz) und erhalten mit Berücksichtigung des Ohm'schen Widerstandes R und des Phasenverschiebungswinkels φ das Diagramm Fig. 82.

Bei Gleichstrom haben wir also:

$$J = \frac{E}{R},$$

beim Wechselstrom

$$J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

d. h. beim Wechselstrom hat sich der Widerstand, wenn Selbstinduktion auftritt, erhöht; die Stromstärke hat einen geringeren Wert.

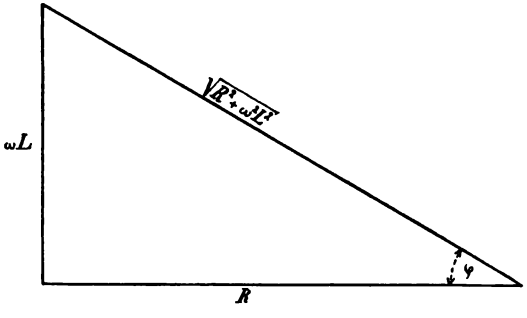


Fig. 82.

Nun steht aber der Phasenverschiebungswinkel φ, wie obiges Diagramm zeigt, zu ωL in Relation. Da

$$\omega = 2\pi \text{ mal Polwechsel},$$

so ist φ von L und der Polwechselzahl abhängig.

Es ist aber die Selbstinduktion um so kleiner, je grösser der Ohm'sche Widerstand in der Leitung ist; daher wird auch in der Praxis hie und da der Ohm'sche Widerstand künstlich vergrössert.

Der bei Wechselstrom-Anlagen vorkommende abnorme Fall, dass die Spannungskurve der Stromkurve voreilt und in der Leitung höhere Spannung herrscht, als an den Klemmen der Dynamo, kann hier unberücksichtigt bleiben, weil dieses Phänomen bis jetzt immer nur bei unbelasteter Leitung beobachtet worden ist.

Bei den oben geschilderten Verhältnissen von J und R im äusseren Wechselstromleiter die Stromwärme und den Spannungsabfall zu bestimmen, ist also eine schwierige Sache, und um den Wirkungsgrad einer Leitung zu berechnen, genügt es nicht, das Produkt $(J^2 R)$ zu kennen, oder die graphische Ermittelung nach dem Ohm'schen Diagramm, wie beim Gleichstrom, vorzunehmen, es müssen da wohl noch viele Versuche angestellt und theoretische Erwägungen gepflogen werden, bis diese Frage als befriedigend gelöst betrachtet werden kann.

Allerdings hat Dr. Ludwig Fischer in der E. T. Z. 1895, Heft 7, Seite 100, eine graphische Tabelle über die Wirkungsgrade der Leitung von Dreiphasenstrom-Anlagen gegeben; er gesteht aber selbst zu, dass die Kontrolle der gegebenen Daten nicht gerade einfach ist; immerhin kann dieselbe gute Dienste leisten.

Digitized by Google

Derselbe Autor giebt in der gleichen Veröffentlichung auch eine allgemeine Formel über den Wirkungsgrad von dreiphasigen Drehstrom-Anlagen, und zwar:

$$\eta = \frac{1}{\frac{3 \varkappa A_{II} l}{Q (c_{II} E_{II})^2} + 1}$$

wobei $\varkappa$ den spezifischen Widerstand des Materiales der Leitung,
A_{II} die am sekundären Ende der Leitung entnommene Energie,
l die einfache Leitungslänge bedeutet;
$c_{II} = \sqrt{3} \cos \varphi_{II}$,
E_{II} und Q aber Werte bezeichnen, in deren formelmässigen Bestimmung η als bekannt vorausgesetzt oder beliebig angenommen ist.

Der theoretische Wert dieser Formel ist nicht zu verkennen; eine Lösung der Frage nach dem Wirkungsgrade elektrischer Wechselstrom-Anlagen bildet dieselbe aber noch nicht.

Nach den vorstehenden Ausführungen muss zugestanden werden, dass es derzeit noch unmöglich ist, für Wechselstrom-Anlagen eine rasch benutzbare Formel für η aufzustellen; wie nötig es aber wäre, eine derartige Relation leicht ermittelbarer Faktoren zu besitzen, wird jeder gerne zugestehen, der im Gebiete des Wechselstromes praktisch oder theoretisch arbeitet, und es kann keinem Zweifel unterliegen, dass die endliche Fixierung einer solchen Formel der Anwendung des Wechselstromes von wesentlichem und bedeutendem Nutzen sein würde.

Betrachtet man schliesslich den Wirkungsgrad einer elektrischen Centralstation in ihrer Gesamtheit, so kommen wir zu einem Endresultat, das allgemein bekannt ist, das aber immer wieder erschreckt, wenn es mit aufdringlicher Nacktheit vor unser Auge tritt.

Setzen wir das Kohlenäquivalent . . . . . = 100
so erhalten wir:

verfügbare Kraft am Dampfablassventil	= ∼	64 %
1 P. S. an der Dampfmaschine	= ∼	4,4 %.
Davon verfügbare Kraft zur Stromerzeugung . .	= ∼	3,62 %
» » » » Schaltbrett . . .	= ∼	3,33 %
» » » » hinter dem Schaltbrett	= ∼	2,83 %.

Allerdings bilden diese Ziffern die äusserste (niedrigste) Grenze, aber auch im Mittelwert können wir den Wirkungsgrad von der Dampfmaschine bis zu den elektrischen Betriebsobjekten (Lampen, Motoren u. s. w.) mit kaum 0,6 ansetzen; gehen wir aber vom Kohlenäquivalent aus, so ist der Wirkungsgrad noch viel geringer.

Da der gute Wirkungsgrad das Endziel aller Konstruktionen bildet, so ist die Ermittelung der den Wirkungsgrad bestimmenden Faktoren die wichtigste und unumgängliche Aufgabe gleich nach der Feststellung der zu erbauenden Maschinentype, und weil diese Faktoren doch nur nach theoretischen Erwägungen gefunden werden können, so ist im Gebiete der Wechselstrom-Technik das Bestreben, umfassende Formeln für den Wirkungsgrad aufzustellen, in erster Reihe zu berücksichtigen und zu fördern.

Digitized by Google

Anschaffungs- und Betriebskosten.

A. Anschaffungskosten.

A. Die Anschaffungskosten für mechanische Transmissionen berechnet man bei kleinen (0,5 bis 1 P.S.) Werkmaschinen ziemlich allgemein mit ℳ 200,— per Maschine. Dabei sind aber nur die Metallbestandteile und die Riemen berechnet. Was bei solchen Transmissionen die Verstärkung des Mauerwerkes, die Schaffung eines kräftigen Unterbaues für die End- und Zwischenlager kostet, das lässt sich in allgemein giltigen Mittelziffern nicht ausdrücken, darf aber bei Kalkulationen nicht übersehen werden. Und diese Kosten sind nicht unbedeutend: denn spart man bei der Anlage der Widerlager, so sind Setzungen der Wände und Lagerungen, infolgedessen Lockern und Verziehen der Befestigungsschrauben und somit ausserordentliche Widerstände in den Transmissionen zu gewärtigen, welche den Wirkungsgrad oft in gewaltiger Weise beeinflussen und Nachtragsausgaben behufs Abhilfe veranlassen.

B. Die Transmission mittels Drahtseil ist so wenig in Gebrauch, dass eine allgemeine Ziffer über die Kosten nicht leicht gegeben werden kann.

Zu bemerken wäre nur, dass nach den Preisverzeichnissen von Felten & Guilleaume in Mühlheim ungefähr folgende Preisansätze in Betracht kommen:

	Seil pro lauf. Mtr.	Zugehörige, einrillige Rolle	1 Lagerstuhl
für 5 P.S.	ℳ 18,—	ℳ 105,—	ℳ 210,—
» 10 »	» 23,—	» 240,—	» 260,—
» 50 »	» 48,—	» 600,—	» 275,—
» 100 »	» 79,—	» 735,—	» 315,—

Auch dabei sind für die Lagerstühle kräftige Fundamente vorzusehen.

Bei allen anderen Arten der Transmission haben wir, um richtige Vergleichsziffern zu erhalten, ausser der Kraftleitung (Wasser, Luft, Elektrizität) auch noch die Kosten des Generators und des Rezeptors, eventuell auch die Kosten der Kraftsammler (Akkumulatoren) mit in Betracht zu ziehen. Wir können uns hier bezüglich der Wasser- und Lufttransmission immer noch und zum grossen Teil an jene Ziffern halten, die Beringer in seiner preisgekrönten Schrift »Kritische Vergleichung der elektrischen Kraftübertragung« gegeben hat, da dieselben auch mit den Ziffern des Prof. A. Riedler und G. Meissners nahezu übereinstimmen.

Digitized by Google

C. Die Krafttransmission mittels Wassertriebwerk:

	1 Druck-pumpe	1 Kraftsamml. mit Armatur u. Anschluss-röhren		Rohr pro lauf. Meter
für 5 P.S.	ℳ 1100	ℳ 1400	1 Motor ℳ 1000	u. 8 *cm* Dm. ℳ 7
» 10 »	» 1900	» 1800	1 » » 1600	» 10 » » » 8
» 50 »	» 5740	» 3250	2 » à » 2560	» 20 » » » 16
» 100 »	» 11480	» 4070	4 » à » 2560	» 27 » » » 31

Die Unterbringung der Kraftsammler und die Montage der Wasserleitung, welche eine ausreichende Lagerung und viel sorgfältige Arbeit bei den Rohranschlüssen erfordert, ist zu berücksichtigen.

D. Die Krafttransmission mittels Lufttriebwerk:

Man braucht beim Luftbetrieb ähnliche Einrichtungen wie beim Wasserbetrieb und stellen sich die Kosten nach Behringer ungefähr wie folgt:

	Luft-kompressor	1 Luftsammler s. Garnitur	1 Motor	Rohre pro lauf. Meter
für 5 P.S.	ℳ 3200	ℳ 1780	ℳ 1950	u. 7 *cm* Dm. ℳ 6,—
» 10 »	» 4800	» 4160	» 2700	» 8 » » » 6,40
» 50 »	» 12800	» 6500	» 11700	» 13 » » » 12,—
» 100 »	» 25600	» 10150	» 16800	» 20 » » » 17,—

Mannesmannrohre (siehe Seite 24) sind leider viel zu theuer und können hier nicht weiter in Betracht gezogen werden.

E. Die Kosten der Krafttransmission mittels Elektrizität.

Die Kosten der Wasser- und Lufttransmission sind derart bedeutend, dass sie bei weiteren Vergleichen gänzlich unberücksichtigt bleiben können; desgleichen die Kosten der Seiltransmission. Nach den vorgebrachten Ziffern können wir als erwiesen annehmen, dass zur Fernleitung und Übertragung von Kräften auf grössere Entfernungen derzeit ausschliesslich die Elektrizität zu benutzen ist. Wir brauchen daher hier nur den Ersatz mechanischer, durch elektrische Transmissionen innerhalb des verhältnismässig engbegrenzten Raumes einer Fabrik in Betracht zu ziehen..

Um aber doch einen vollständigen Vergleich auch für Fernleitungen zu ermöglichen, sei hier für die elektrische Transmission eine Tabelle, welche den Verhältnissen und Voraussetzungen der obigen Tabellen entspricht, aufgestellt:

	1 elektrischer Generator	1 elektrischer Motor	Kupferdraht-Leitung
für 5 P.S.	ℳ 1000	ℳ 1000	pro lauf. Mtr. u. 5 *mm* Dm. ℳ 0,37
» 10 »	» 1700	» 1700	» » » » 5 » » » 0,37
» 50 »	» 4000	» 4000	» » » » 6 » » » 0,55
» 100 »	» 7000	» 7000	» » » » 8 » » » 1,00

wenn, wie in den anderen Fällen, bei der Leitung eine Entfernung von 100 *m* angenommen wird. Dabei sind allerdings die Primär-

Digitized by Google

motoren (Dampfmaschine, Turbine) und die Stützpunkte für die Leitung noch nicht berücksichtigt. Die Kosten der Leitung sind bei allen Systemen ausschlaggebend; sie erhöhen sich mit zunehmender Entfernung ganz gewaltig viel mehr als in direktem Verhältnisse.

Vergleichen wir nun direkt die Kosten einer mechanischen Fabriktransmission mit einer elektrischen; z. B.: Eine Fabrik soll 50 Werkmaschinen, und zwar Wirk- oder Webstühle, erhalten, von denen jede $^3/_4$ P.S. beansprucht.

I. Wir setzten vorhin die Kosten mechanischer Transmissionen kleine Werkmaschine mit ℳ 200,— an, daher:

$$50 \times 200 = ℳ\ 10000,—.$$

II. Für die elektrische Transmission würden wir brauchen:

50 kleine Elektromotoren und Anlasswiderstände à 250	=	ℳ 12500
1 Elektro-Generator zu 40 P.S.	=	» 3500
Leitung u. s. w.	=	» 1300
		ℳ 17300

Die elektrische Transmission veranlasst demnach und derzeit und in diesem Falle 73% Mehrkosten. Je grösser die Zahl der Werkmaschinen, desto günstiger wird dieser Prozentsatz. Es wurde aber schon darauf hingewiesen, dass sich die Kosten schliesslich doch nähern, wenn wir bei der mechanischen Transmission die nötige Verstärkung der Mauern und die Aufmauerung von Stützpunkten für die Wellenlager mit in Rechnung stellen.

Betrachten wir ein anderes Beispiel, das wiederholt mit mehr oder weniger günstigen Betriebserfolg ausgeführt worden ist:

Es sind 1000 Webstühle aufgestellt worden. Rechnen wir mit obigen Einheitssätzen, so ergeben sich folgende Resultate:

I. 1000 kleine Webstühle, mechanische Transmission, p. Stck. ℳ 200,—

$$200 \times 1000 = ℳ\ 200000,—.$$

II. 1000 kleine elektrische Motoren, komplett à ℳ 250	=	ℳ 250000
2 Elektro-Generatoren zu je 400 P.S. komplett .	=	» 60000
Die Leitung u. s. w.	=	» 10000
		ℳ 320000

Man sieht, dass in diesem Falle die elektrische Transmission nur mehr ca. 60% teurer ist als die mechanische, und gewiss wird sich auch dieser Prozentsatz noch verringern, wenn wir die Verstärkung der Grundmauern und der Widerlager für die mechanischen Transmissionswellen mit berechnen.

Der Preis für Holzmaste (10 *m* Länge mit 16 bis 18 *cm* Zopfstärke) stellt sich auf . . . . . ca. ℳ 10 bis 18; der Preis für eiserne Maste von 8 bis 15 *m* Länge » » 60 » 400. Montagekosten: 10 bis 15% des Gesamtanschaffungswertes.

Digitized by Google

Die in nachstehenden Tabellen enthaltenen Ziffern geben Anhaltspunkte zu rohen Vorausberechnungen. Beabsichtigt man die Maschinen u. s. w. wirklich zu bestellen, dann wird sich die Einholung von Sonderangeboten auf jeden Fall empfehlen.

Approximative Kosten.

a. Dampfkessel und Dampfmaschinen.

Normale Leistung in eff. P.S.	9,0	11,0	13,0	14,0	16,5	18,0	28,5	42,0	55,0	84,0	108,0
Gesamtgewicht in *kg* ca. . . .	3400	9000	10000	10000	11700	12200	15000	18000	23000	30200	33500
Preis der Anlage in Mark . . .	6500	7200	8000	8400	9500	10000	12000	14500	18500	22000	24000

(Berechnet für Dampfkessel und Dampfmaschine einschl. Dampfpumpe, Injektor, Rohrleitungen, Warmwasserreservoir, Kanalabdeckplatten, Schutzgeländer und Riemen nebst Verpackung.)

b. Dampfmaschinen.

Normale Leistung in eff. P.S.	9,0	11,0	13,0	14,0	16,5	18,0	28,5	42,0	55,0	84,0	108,0
Gesamtgewicht in *kg* ca. . . .	1900	2600	2650	2650	3150	3400	4000	5000	7000	10650	12500
Preis der Anlage in Mark . . .	2100	2400	2500	2750	3150	3400	4000	5000	6700	8300	9100

(Berechnet ausschliesslich Rohrleitung, einschliesslich Riemen und Schutzgeländer nebst Verpackung.)

c. Lokomobilen.

Normale Leistung in eff. P.S.	3,0	5,5	11,0	13,0	17,0	28,5	42,0	55,0	82,0	108,0
Gesamtgewicht in *kg* ca. . . .	3000	4000	4500	6500	8500	12000	15000	19000	30000	35000
Preis der Anlage in Mark . . .	4250	4700	7300	8250	9770	13500	16000	19000	28000	31000

(Berechnet für Lokomobilen mit Zubehör, eisernem Schornstein, Riemen, Schutzgeländer, der erforderlichen Rohrleitungen für Wasser innerhalb des Maschinenhauses und Verpackung.)

d. Gasmotoren.

Normale Leistung in eff. P.S.	3	4	6	10	12	16	20	30	40	50	60	100
Gesamtgewicht in *kg* ca. . .	2500	3000	3700	4500	5500	8000	9000	13000	15000	17000	20000	30000
Preis der Anlage in Mark . .	4000	4300	5000	6800	8000	8500	9500	12000	14000	15500	17000	23000

(Berechnet mit Fundamentanker, Rohrleitungen, Schutzgeländer und Riemen nebst Verpackung.)

Digitized by Google

e. Dynamomaschinen (Gleich- oder Wechselstrom).

Kraftbedarf in eff. P.S.	3,0	3,8	5,5	9,0	11,0	13,0	14,0	17,0	28,5	42,0	55,0	82,0	108,0
Gesamtgewicht in *kg* ca. . .	400	370	470	630	630	1100	1200	1450	2120	2400	2650	3750	5100
Preis der Anlage in Mark . .	900	1200	1300	1500	1600	1900	2100	2200	2800	3500	4300	5600	6800

(Berechnet mit Nebenschlussregulator, Schalttafel mit Mess- und Schaltapparaten und Bleisicherungen, Verbindungsleitung zwischen Maschine und Schalttafel nebst Verpackung.)

Grosse Wechselstrommaschinen aller Art können mit ℳ 100.— pro 1 Kilowatt angesetzt werden; Transformatoren mit ℳ 80.— pro 1 Kilowatt.

f. Elektromotoren (Gleich- oder Wechselstrom).

Leistung in eff. P.S.	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	6	7
Gesamtgewicht in *kg* ca. .	180	250	250	360	370	600	470	470	830
Preis der Anlage in Mark	550	850	900	1200	1200	1300	1300	1300	1500

Leistung in eff. P.S.	8	10	12	22	32	45	66	88
Gesamtgewicht in *kg* ca. . . .	630	1000	1450	2120	2400	2650	3750	5100
Preis der Anlage in Mark . .	1550	2200	2200	3100	3700	4500	5800	7000

(Berechnet für normalen Anlasswiderstand, Schalttafel mit Schaltapparaten und Bleisicherungen, Verbindungsleitung zwischen Motor und Schalttafel nebst Verpackung.)

Akkumulatoren (Batterie von 60 Zellen) einschliesslich Schalttafel mit Apparaten, Doppelzellenschalter und Verbindungsleitungen (unter der Annahme, dass Maschinen- und Akkumulatorenraum dicht neben- oder übereinander liegen) zur Maschinenschalttafel nebst Zubehör und seetüchtiger Verpackung.

No. der Zellen	9	11	13	15
Höchste zulässige Ladestromstärke in Ampère	55	73	110	147
Bedarf an Schwefelsäure von 19° Baumé in *l*	1320	3300	4380	5460
Gewicht der kompl. Batterie brutto in *kg* ca.	5640	9130	12440	15760
Raum der kompl. Batterie, Länge in *m* . .	5	8	8	8
do. Breite » » . .	2,2	2,1	2,3	2,5
do. Höhe » » . .	2,7	2,7	2,7	2,7
Kosten der kompl. Anlage in Mark . . .	6350	8700	11800	14500
Ungefähre Dauer der Montage in Stunden .	180	200	220	240

No. der Zellen	17	19	21	23
Höchste zulässige Ladestromstärke in Ampère	184	221	257	294
Bedarf an Schwefelsäure von 19° Baumé in *l*	6540	7620	8700	11040
Gewicht der kompl. Batterie brutto in *kg* ca.	19080	22400	25740	33270
Raum der kompl. Batterie, Länge in *m* . .	8,6	8,6	8,6	9,4
do. Breite » » . .	6,7	7,2	7,6	6,5
do. Höhe » » . .	2,2	2,2	2,2	2,4
Kosten der kompl. Anlage in Mark . . .	18000	21000	23500	26800
Ungefähre Dauer der Montage in Stunden .	260	300	340	380

Digitized by Google

No. der Zellen	25	27	29	31
Höchste zulässige Ladestromstärke in Ampère	368	441	515	589
Bedarf an Schwefelsäure von 19° Baumé in *l*	13200	15360	17520	19680
Gewicht der kompl. Batterie brutto in *kg* ca.	40530	47160	54380	61620
Raum der kompl. Batterie, Länge in *m* . .	9,4	9,5	9,6	9,7
do. Breite » » . .	6,9	7,4	7,9	8,3
do. Höhe » » . .	2,4	2,4	2,4	2,4
Kosten der kompl. Anlage in Mark . . .	32800	38800	45400	51000
Ungefähre Dauer der Montage in Stunden .	420	460	500	540

No. der Zellen	33	35	37	39
Höchste zulässige Ladestromstärke in Ampère	662	736	883	1030
Bedarf an Schwefelsäure von 10° Baumé in *l*	21840	24000	30720	35040
Gewicht der kompl. Batterie brutto in *kg* ca.	68870	75850	88850	101500
Raum der kompl. Batterie, Länge in *m* . .	9,8	9,9	11,1	11,2
do. Breite » » . .	8,8	9,3	10,5	11,2
do. Höhe » » . .	2,4	2,4	2,4	2,4
Kosten der kompl. Anlage in Mark . . .	57700	63200	75700	87700
Ungefähre Dauer der Montage in Stunden .	580	620	666	700

In den obigen Preisen und Gewichten sind die der erforderlichen Schwefelsäure und des Holzgestelles nicht eingeschlossen. Die Schwefelsäure muss frei von Chlor, Arsen, Stickstoff, Eisen und Zink sein; ungefährer Preis ℳ 6.— pro 100 *l*.

In neuerer Zeit wurden die Preise für Akkumulatoren um 10 bis 15% ermässigt.

Ausführlichere Liste über Kosten verschiedener Maschinen und Maschinenteile.

Dynamomaschinen und Motoren.

Volt	Ampère	P. S.	n bei 110|180 Volt	n bei 110 Volt	Preis der Maschine	Riemenspannung	Ankerplatte	Ankerbolzen	Regulator ℳ	$\eta \times 100$
		4		*1200*	ℳ	ℳ	ℳ		*144,—*	*83*
110	32	6,5	1400	1300	700,—	36,—	16,—		60,—	73,4
		6		*1100*					*168,—*	*84*
110	50	9,5	1300	1200	900,—	41,—	16,—		60,—	75,6
		9		*1000*					*216,—*	*85*
110	75	14	1100	1050	1400,—	51,—	17,—		66,—	79,4
		12		*900*					*240,—*	*86*
110	100	14	1000	950	1700,—	64,—	17,—		66,—	83,1
		20		*800*					*300,—*	*87*
110	150	26	950	850	2000,—	82,—	27,—		66,—	86,3
		25		*700*					*384,—*	*88*
110	200	35	850	800	2300,—	102,—	36,—		72,—	85,4
		40		*550*					*456,—*	*89*
110	300	50	650	600	2800,—	122,—	43,—		83,—	89,7
		53		*450*					*516,—*	*90*
110	400	66	550	500	4100,—	153,—	53,—		83,—	90,4

Die Preise sind natürlich nur ungefähr angegeben. n = Tourenzahl.
Die schrägen Ziffern gelten, wenn die Maschine als »Motor« verwendet wird.

Digitized by Google

Ungefähre Preise grosser Gleichstromdynamos.

P. S. 100	ca. ℳ 6100,—		
» 150	»	» 8500,—	bis 9000,—
» 180	»	» 12000,—	» 14000,—
» 220	»	» 16300,—	» 16800,—

Dampfdynamo.				Verpackung
P. S. 6,2	ℳ 2550,—	P. S. 16,5	ℳ 5750,—	ℳ 110,—
» 7,5	» 3000,—	» 23,5	» 6700,—	» 130,—
» 10,5	» 3600,—	» 31,0	» 7700,—	» 150,—
» 16,5	» 4550,—	» 41,5	» 9500,—	» 170,—
» 23,5	» 5400,—	» 50,0	» 11100,—	» 200,—
» 31,0	» 6550,—	» 62,0	» 12100,—	» 220,—
(Eincylinder, vertikal)		» 100	» 17000,—	» 250,—
		» 127	» 25000,—	» 270,—
		» 175	» 31000,—	» 320,—
		(Compound-Dampfmaschine)		

Kleine Gleichstromelektromotoren.

Pole	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4
Leistung in P. S.	1/8	1/2	1	2	3	3	5	5	7 1/2	7 1/2	10
Touren bei 110 Volt	1400	1200	1000	1100	1050	950	1500	850	1275	800	1070
Touren bei 220 »	1400	1400	1000	1100	1650	950	1500	850	1275	800	1070
Touren bei 500 »	1600	1650	1250	1250	1850	1050	1650	960	1450	900	1280
Preis 110 bis 220 Volt	100,—	290,—	400,—	600,—		800,—		950,—		1100,—	
Preis 500 »	120,—	350,—	450,—	720,—		840,—		1000,—		1150,—	
Riemenspanner	—	—	—	15,—		25,—		35,—		50,—	
Fundamentrahmen aus Holz	—	—	—	10,—		10,—		15,—		20,—	

Preise exkl. Fundamentschrauben und Verpackung.

B. Betriebskosten.

Dieselben setzen sich bei jeder Anlage zusammen aus:

1. der jährlichen Quote für Amortisation und Verzinsung des Anlagekapitals;
2. den gesetzlichen und etwa sonstigen vereinbarten Abgaben;
3. den Kosten für Betriebsmaterialien (Heizkohlen, Holz, Wasser, Gas, Schmieröl, Putzmaterial u. s. w.);
4. den Kosten für Bedienung und Wartung der Anlage;
5. den Kosten für Reparatur und Erneuerung.

An Heizkohlen rechnet man:

für Eincylinder-Dampfmaschinen ca. 3 *kg*
» Compound- » » 2 » } pro 1 P. S. und Stunde.

Für das Anheizen sind 3 *kg* Kohlen pro 1 *qm* Heizfläche anzusetzen.

Die Gasmotoren brauchen 0,8 bis 1 *cbm* Gas und 40 bis 50 *l* Kühl-Wasser pro 1 P. S. - Stunde.

Digitized by Google

Beispiele elektrischer Kraftübertragungen und zugehörige Berechnungen.

26. Beispiel. Mittels Gleichstrom soll eine konstante Wasserkraft von 50 P.S. auf 10 *km* übertragen werden. $\eta_1 = 0{,}90$; $\eta_2 = 0{,}88$; $\eta_3 = 0{,}90$; Betriebsspannung = 1500 Volt.

Wir erhalten:

Gesamtarbeit: . . . . . $A = 50$ P.S. $= 36800$ Watt;
Primärspannung . . . . $e_1 = 1500$ Volt;
Für die Primär-Dynamo . $\eta_1 = 0{,}90$;
Verlust in der Leitung . . $e_p = 150$ Volt;
Arbeit der Primär-Dynamo $A_1 = 50 \times 736 \times 0{,}90 = 33120$ Watt;
Stromstärke . . . . . $J = \frac{33120}{1500} = \sim 22$ Ampère.

Länge der Leitung $2 \times 10000 = 20000\ m$ und es genügt ein 8 *mm* Kupferdraht, dessen Widerstand $R = 6{,}63$ Ohm, weil

$$q = \frac{2\,l\,J}{60 \times \text{Voltverlust}}$$
$$= \frac{2 \times 10000 \times 22}{60 \times 150}$$
$$= 50\ qmm.$$

---

27. Beispiel. Ermittelung der nötigen Betriebskraft. Die Dynamo leiste: bei $e = 110$ Volt; $i = 90$ Ampère; daher $ei = 110 \times 90 = \sim 10000$ Watt; bei $\eta = 0{,}88$.

Wir erhalten $736 \times 0{,}88 = 645$ Watt von einer mechanischen P.S. und brauchen daher:

$$\frac{10000}{645} = 15{,}5 \text{ P.S.}$$

28. Beispiel. Eine Normal-Glühlampe braucht bei 100 Volt 0,5 Ampère. Infolgedessen ist der gesamte Energiebedarf:

$$A = 100 \times 0{,}5 = 50 \text{ Watt}$$

und pro Kerze ist:

$$A_k = \frac{50}{16} = 3{,}12 \text{ Watt.}$$

29. Beispiel. Eine Bogenlampe braucht 8 Ampère bei 45 Volt an den Lampenkohlen.

$$A = 8 \times 45 = 360 \text{ Watt.}$$

Die entwickelte Wärmemenge ist pro Minute:

$$Q = 0{,}24 \times 8 \times 45 \times 60 \text{ Gr.-Kal.}$$

30. Beispiel. Im Anker ist $B = 12000$ Kraftlinien (oder C.-G.-S.-Einheiten). Das Volumen des Ankers = 18000 *ccm*; $n_1 = 20$ (pro Sekunde); dann beträgt der Energieverlust pro Kreisprozess und *ccm* nach einer von Steinmetz aufgestellten Tabelle 10100 Erg; folglich für 20 Kreisprozesse und 18000 *ccm*:

$$20 \times 18000 \times 10100 = 36{,}36 \times 10^7 \text{ Erg pro Sekunde,}$$
$$= 36{,}36 \text{ Watt.}$$

Digitized by Google

Die Berechnung des Generators und des Motors ergiebt für

$$R_G = 7{,}5 \text{ Ohm};$$
$$R_M = 7 \text{ Ohm};$$
$$\Sigma R = R_G + R_L + R_M = 7{,}5 + 6{,}63 + 7 = 21{,}13 \text{ Ohm}$$

und es ist daher der gesamte Spannungsverlust:

$$e_p = 22 \times 21{,}13 = \sim 465 \text{ Volt, und daher}$$
$$e_2 = 1500 - 465 = 1035 \text{ Volt; daraus folgt:}$$
$$\eta = \frac{1035}{1500} = 0{,}686;$$

das ist also ein Verlust von ca. 12 000 Watt; rechnen wir noch $2 \times 3\,\% = 6\,\%$ mechanische Verluste = 2200 Watt; so wird

$$\eta = \frac{36\,800 - (12\,000 + 2200)}{36\,800} = 0{,}614;$$

sodass an der Welle des Motors

$$A = 50 \times 0{,}614 = 30{,}7 \text{ P.S. zur Verfügung stehen.}$$

Dabei sind die Stromverluste noch nicht berücksichtigt. Es sind $\frac{10000}{40} = 250$ Säulen und 500 Stützpunkte nötig; die letzteren verursachen so viel Stromverlust, dass dieser nicht unberücksichtigt bleiben kann. Das Kupfer zu einer solchen 8 *mm* Leitung würde allerdings ℳ 10000,— kosten.

Digitized by Google

Projekt zu einer Kraftübertragung.

31. Beispiel. 160 P. S. sollen mit Gleichstrom auf 70 *m* übertragen werden. Die Details sind aus dem Kostenanschlag zu ersehen. In der Primärstation (Turbinenhaus) wird eine Gleichstromdynamo aufgestellt, welche durch Riementrieb von der Turbinenwelle aus angetrieben wird.

Die Dynamomaschine ist 8polig gebaut, hat Nutentrommelanker und macht ca. 350 Touren in der Minute. Die Tourenzahl der Maschine kann innerhalb einer Grenze bis $\pm$ 10% schwanken (d. h. der Motor kann innerhalb derselben Grenze über- oder entlastet werden), da durch den automatisch wirkenden Regulator die Spannung an der Dynamomaschine auf ca. 510 Volt konstant gehalten wird.

In der Dynamostation sind auf einer Marmortafel in übersichtlicher Weise alle Schalttafelapparate angeordnet. Bleisicherungen schützen die ganze Anlage vor zu starken Strömen. Einer besonderen ständigen Wartung bedarf die Dynamostation nicht, da nach Einrückung des Schalthebels die Regulierung, wie schon erwähnt, automatisch bewirkt wird.

Die Leitung (ca. 70 *m*) ist als Freileitung gedacht und soll auf geradem Wege von ihrer Austrittsstelle an der Dynamostation mit Unterstützung durch einen Mast zur Motorstation führen. Auch hier schützen Bleisicherungen das Ende der Leitung und sind diese mit allen übrigen Schalttafelapparaten wieder übersichtlich auf einer Marmortafel angeordnet. Durch einen Schalthebel kann die ganze Anlage eingerückt resp. ausser Betrieb gesetzt werden. Ein Anlasswiderstand mit Tourenregler ermöglicht die Umdrehungszahl des Motors in Grenzen bis zu $\pm$ 10% zu verändern. Die Wirkungen wechselnder Belastung des Motors innerhalb der angegebenen Grenzen werden an der Dynamomaschine automatisch ausgeglichen.

Der Motor ist mit Riemenscheibe versehen und macht ebenfalls ca. 350 Touren; er ist ähnlich wie die Dynamo gebaut.

Alle Innenleitungen entsprechen bezüglich ihrer Querschnittsbemessungen und ihrer Verlegung auf Porzellanrollen bezw. in Hartgummi- oder Bergmann-Rohr den Anforderungen der Feuerversicherungs-Gesellschaften und den Festsetzungen des Verbandes deutscher Elektrotechniker. (Neue Ausgabe dto., Frankfurt a. M. 1898.)

Digitized by Google

Kostenanschlag.

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im einzelnen ℳ	Betrag im ganzen ℳ
	1. Dynamo.		
1	Gleichstromnebenschluss-Dynamo mit einer Leistung von 122 Kilowatt bei 240 Amp. und 510 Volt Spannung; Kraftverbrauch ca. 200 P. S. mit Riemenscheibe; Gewicht der verpackten Maschine 12000 *kg* . . .		9000,—
1	Satz Fundamentschienen mit Spannschlitten .		250,—
1	automatischer Nebenschlussregulator . . .		370,—
25 *m*	Zuleitungskabel von 150 *qmm* Querschnitt . . . . . %	355,—	88,75
25 *m*	isolierter Kupferdraht; Querschnitt 6 *qmm* %	19,50	4,90
4	Kabelschuhe		5,04
	Montage der Maschine nebst Leitungen . .		65,—
	Löt- und Isoliermaterial		6,—
			9789,69
	2. Schalttafel für die Dynamostation.		
1	Strommesser bis 300 Amp.		50,—
1	Spannungsmesser bis 550 Volt		82,—
2	Bleisicherungen einpolig bis 300 Amp. . .	7,—	14,—
2	Bleistreifen bis 250 Amp.	1,60	3,20
1	Hebelausschalter zweipolig bis 300 Amp. . .		56,—
2	Kabelschuhe für 150 *qmm*		2,52
15 *m*	Leitungskabel von 150 *qmm* Querschnitt %	355,—	53,25
2	Verbindungsmuffen mit Verjüngung von 150 auf 65 *qmm*	3,50	7,—
80	Stück Porzellanrollen mit Schrauben und Dübeln . . . . . %	5,50	4,40
	Montage des Schaltbrettes inkl. Löt-, Isolier- und Befestigungsmaterial		30,—
1	Marmortafel mit Rahmen		70,—
			372,37
	3. Freileitung.		
	Unter der Annahme, dass die Leitungslänge für Hin- und Rückleitung 150 *m* beträgt, sind erforderlich:		
150 *m*	blankes Kupferseil von 63 *qmm* Querschnitt		136,—
1	imprägnierter Leitungsmast		15,—
6	Isolatoren mit Holzschraubenstützen . . .		4,50
4	Einführungspfeifen mit 2 *m* Hartgummi-Eisenrohr		3,70
	Montage der Freileitung		23,—
	Löt-, Isolier- und Bindematerial		2,—
			184,20

Digitized by Google

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im einzelnen ℳ	Betrag im ganzen ℳ
	4. Schalttafel mit Zuleitung für die Motorstation.		
1	Strommesser bis 300 Amp.		50,—
1	Spannungsmesser bis 550 Volt		82,—
2	Bleisicherungen einpolig bis 300 Amp. . .	7,—	14,—
2	Bleistreifen bis 250 Amp.	1,60	3,20
1	Hebelausschalter zweipolig bis 300 Amp. . .		56,—
2	Kabelschuhe für 150 *qmm*		2,52
15 *m*	Leitungskabel von 150 *qmm* Querschnitt %	355,—	53,25
2	Verbindungsmuffen mit Verjüngung von 150 auf 65 *qmm*	3,50	7,—
80	Stück Porzellanrollen mit Schrauben und Dübeln . . . . . %	5,50	4,40
	Montage des Schaltbrettes inkl. Löt-, Isolier- und Befestigungsmaterial		30.—
1	Marmortafel mit Rahmen		70,—
			372,37
	5. Elektromotor.		
1	Gleichstrom-Nebenschlussmotor mit einer Leistung von ca. 140 P. S. und einem Stromverbrauch von 200 Amp. bei 500 Volt Spannung; mit Riemenscheibe; Gewicht des verpackten Motors 12000 *kg*		8600,—
1	Satz Fundamentschienen mit Spannschlitten .		250,—
1	Flüssigkeitsanlasswiderstand mit Tourenregler		350,—
25 *m*	Zuleitungskabel von 150 *qmm* Querschnitt %	355,—	88,75
25 *m*	isolierter Kupferdraht v. 6 *qmm* Querschnitt %	19,50	4,90
4	Kabelschuhe		5,04
	Montage des Motors nebst Zuleitung . . .		65,—
	Löt- und Isoliermaterial		6,—
			9369,69
	6. Verpackung und Fracht.		
	Verpackung für die Dynamo bei freier Zurücksendung in gutem Zustande innerhalb 14 Tagen nach Aufstellung der Maschine .		75,—
	dito für den Motor unter denselben Bedingungen		75,—
	Verpackung des kompl. Schaltbrettes inkl. Zuleitung zur Maschine für die Dynamostation		12,—
	dito für die Motorstation		12,—
	Verpackung des Isolier- und Bindematerials; Gewicht inkl. Verpackung ca. 25000 *kg* .		6,—
	Frachtgebühr auf . . . *km* Entfernung . .		
			180,—

Digitized by Google

Zusammenstellung.

1. Dynamo	9789,69
2. Schalttafel mit Zuleitung	372,37
3. Freileitung	184,20
4. Schalttafel mit Zuleitung	372,37
5. Elektromotor	9369,69
6. Verpackung und Fracht	180,—
	20268,32

Die Kosten für das Vorgelege zur Dynamo, für das Vorgelege zum Motor, für die nötigen Mauer- und Zimmerarbeiten und die Reisekosten für die Monteure sind in den angesetzten Preisen nicht mit enthalten.

32. Beispiel. Dieselbe Fabrik ist auch für elektrische Beleuchtung einzurichten. Nötig sind:

8 Bogenlampen (4 Paar) à 1000 Nk. } An 300 Tagen,
150 Glühlampen à 16 » } je 3 Stunden;

2 Elektromotore zu 2 bezw. 6 P. S. eff., an 300 Tagen, je 8 Stunden, vollbelastet.

Verwendet wird dazu eine Eincylinder-Dampfmaschine.

Diese Anlage kostet ℳ 22000,—.

Berechnung: Es müssen $(7{,}5 + 15) \times 3 \times 300 = \sim 20700$ P. S.-Stunden pro Jahr für die Beleuchtung geleistet werden.

8 eff. P. S. erfordern an der Welle der Dampfmaschine

$$8 \times 1{,}33 = 10{,}6 \text{ P. S. eff.},$$

demnach sind $10{,}6 \times 8 \times 300 = \sim 25000$ P. S.-Stunden für die Motoren zu leisten, das macht in Summa 45700 P. S.-Stunden, und die Betriebskosten werden sich belaufen auf:

Heizkohle 45700 × 3 *kg*, wenn 100 *kg* ℳ 2,— . . .	ℳ 2742,—
Anheizen an 300 Tagen bei 50 *qm* Fläche, à 3 *kg* . .	» 900,—
Schmier- und Putzmaterial, 15 % von ℳ 3642,— . .	» 546,—
Bedienung: ein Mann pro Monat ℳ 120,—	» 1440,—
Reparatur und Unterhaltungskosten, 2 % von 22000,—	» 440,—
Amortisation und Verzinsung, 10 % von 22000,— . .	» 2200,—
Summa der Betriebskosten:	ℳ 8268,—

33. Beispiel. In einer kleinen Fabrik, in welcher der Raum zur Aufstellung eines Dampfmotors fehlt, sollen 20 Elektromotoren à 2 P. S. aufgestellt werden. Der Raum für den Primärmotor (Dampf-, Gas-) ist 100 *m* entfernt vom Fabriksgebäude gewonnen worden. Es wird eine 50 P. S.-Compound-

Digitized by Google

Dampfmaschine (mit Kondensation) aufgestellt (Preis samt Kessel ca. 13000 ℳ); ferner eine Dynamo-Gleichstrom-Maschine für 350 Ampère bei 110 Volt, also ca. 40 Kilowatt (5000 ℳ). Die 20 Motoren brauchen ca. 38 Kilowatt (kosten zusammen 10000 ℳ). Die gesamten maschinellen Einrichtungen kosten daher inkl. Transmissionen und Leitungen ca. 40000 ℳ.

Jeder Motor arbeitet an 300 Tagen je 10 Stunden, das sind:

$$20 \times 2 \times 10 \times 300 = 120000 \text{ P. S.-Stunden,}$$

pro Pferdestärke rechnet man 850 Watt, das giebt:

$$20 \times 850 \times 2 \times 10 \times 300 = 102000000 \text{ Watt-Stunden.}$$

Die Betriebskosten sind daher zu berechnen:

I. Bei einer Dampfmaschinen-Anlage.

Kohlenverbrauch: 2 *kg* pro P. S.-Stunde, also 2 × 120000 = 240000 *kg*, à 1,50 ℳ = ...	ℳ	3600
Schmier- und Putzmaterial: 0,5 ₰ pro P. S.-Stunde (120000 × 0,5)	»	600
Dynamo- und Motorbürsten	»	40
Gehalt des Maschinisten	»	1200
Reparaturen und Erneuerungen (1,5 % von 40000 ℳ) .	»	600
Verschiedenes (Arbeitsaushilfe u. s. w.)	»	360
zusammen	ℳ	6400
Ferner: Verzinsung des Anlagekapitals (4 % von 40000 ℳ)	»	1600
Amortisation (7,5 % von 40000 ℳ)	»	3000
Betriebsausgaben	ℳ	11000

Kosten der P. S.-Stunde **0,0916 ℳ.**

II. Bei einer Gasmotoren-Anlage.

(Die Anschaffungskosten stellen sich ziemlich gleich wie bei Dampf-Anlagen.)

Gasverbrauch: 0,65 *cbm* pro P. S.-Stunde, also (0,65 × 120000) × 10 ₰ = ...	ℳ	7800
Schmier- und Putzmaterial: 0,5 ₰ pro P. S.-Stunde (120000 × 0,5)	»	600
Dynamo- und Motorbürsten	»	40
Gehalt des Maschinisten	»	1200
Reparaturen und Erneuerungen (1,5 % von 40000 ℳ) .	»	600
Verschiedenes (Arbeitsaushilfe u. s. w.)	»	360
zusammen	ℳ	10600
Ferner: Verzinsung des Anlagekapitals (4 % von 40000 ℳ)	»	1600
Amortisation (7,5 % von 40000 ℳ).	»	3000
Betriebsausgaben	ℳ	15200

Kosten der P. S.-Stunde **0,120 ℳ.**

Digitized by Google

III. Bei einer Gasmotoren-Anlage mit Dawson-Apparat.

(Die Anschaffungskosten erhöhen sich auf 45000 ℳ.)

Kohlenverbrauch: für den Dampfkessel pro P. S.-Stunde 0,1 *kg*
» » Generator » » 0,6 »
0,7 *kg*

100 *kg* engl. Anthracit 2,50 ℳ, 120000 × 0,7 × 2,50 = .	ℳ	2100
Reparaturen und Erneuerungen (1,5 % von 45000 ℳ) .	»	675
Schmier- und Putzmaterial: 0,5 ₰ pro P. S.-Stunde (120000 × 0,5)	»	600
Dynamo- und Motorbürsten	»	40
Gehalt des Maschinisten	»	1200
Verschiedenes (Arbeitsaushilfe u. s. w.)	»	360
zusammen	ℳ	4975
Ferner: Verzinsung des Anlagekapitals (4 % von 45000 ℳ)	»	1800
Amortisation (7,5 % von 45000 ℳ)	»	3375
Betriebsausgaben	ℳ	10150

Kosten der P. S.-Stunde 0,0846 ℳ.

---

34. Beispiel. Für einen Steinbruch soll eine elektrische Bohranlage beschafft werden. Über die Einzelheiten giebt nachfolgender Kostenanschlag die nötigen Aufschlüsse.

Kostenanschlag.

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im einzelnen ℳ	Betrag im ganzen ℳ
3	Stück Dampfmaschinen à 90 P. S. . .	10000,—	30000,—
3	Stück Cornwallkessel à 80 *qm*	8000,—	24000,—
3	Stück Dynamomaschinen (Gleichstrom) 75 *kw*	6000,—	18000,—
	Gebäude der Centralanlage für die vorstehenden drei und dann auch noch für zwei gleiche Maschinen-Aggregate . .		22000,—
	Schornstein		8000,—
	Fundamente für Maschinen und Kesseleinmauerung		2400,—
	Rohrleitungen und Centrifugalpumpe mit Elektromotoren-Betrieb		2500,—
	Schalttafel		3000,—
	Maste für die Leitung (à 40 *m*, d. s.		
	Summa		109900,—

Digitized by Google

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im einzelnen ℳ	Betrag im ganzen ℳ
	Übertrag		109 900,—
	200 × 15 ℳ)		3000,—
	Montage (7500 *m* Draht × 15 ₰) rund .		1000,—
	Isolatoren und Kleinmateriale		500,—
	Drahtleitung:		
	2600 *m* 50 *qmm* 6000 » 70 » 2400 » 160 » 4000 » 100 » } 12000 *kg* à 1,50 ℳ		18000,—
	Zuschlag wegen Umwegen und Durchhang		2000,—
	Maschinen- und Schalttafel-Montage . .		400,—
	Frachten und Manipulations-Gebühren, Abrundung, Unvorhergesehenes etc. . .		5200,—
	Zusammen		140000,—

Betriebskosten-Anschlag.

1. Amortisation 10 %	14000,—
2. Verzinsung 5 %	7000,—
3. Personalunkosten	3500,—
Kohlen 250 P. S. × 300 Tage × 5 Stunden = 375000 P. S.-Stunden × 3 *kg* Braunkohlen = 1125000 *kg* = 1125000 × 1 ₰	11250,—
Schmier- und Putzmaterialien	750,—
Abgaben, Reparatur, Instandhaltung	1500,—
	38000,—

Rechnen wir pro P. S.-Stunde 10 ₰, so ergiebt das bei den oben angeführten 375000 P. S.-Stunden eine jährliche Brutto-Einnahme von 375000 × 10 = ℳ 37500, d. h. Betriebskosten, Amortisation und Verzinsung sind gedeckt. Bei 12 ₰ pro P. S.-Stunde ergiebt sich sogar eine Superdividende. Zumeist wird die P. S.-Stunde aber doch wohl mit 15 bis 20 ₰ abgegeben.

Digitized by Google

Kostenanschlag zu einer Kraftübertragung mit Drehstrom.

I. Fall.

35. Beispiel. Mittels Drehstrom sollen 350 P. S. mit eventuell 3000 oder 4000 Volt Lienienspannung übertragen werden. Aus dem Kostenanschlag sind die Details zu ersehen.

Kostenanschlag.

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im einzelnen ℳ	Betrag im ganzen ℳ
1	Drehstrom-Generator für 3000 Volt Spannung, welcher bei einem Kraftverbrauch von 323 P. S. und bei induktionsfreier Belastung 227 Kilowatt leistet, 300 Umdrehungen pro Minute macht und 24 *m* Riemengeschwindigkeit pro Sekunde gestattet; einschliesslich Riemenscheibe und drei Lager		26500,—
1	Gleichstrommaschine zur Erregung für 110 Volt Spannung und einer Leistung bis zu 15 Kilowatt bei einem maximalen Kraftverbrauch von 23,5 P. S. für eine Riemengeschwindigkeit von 14 *m* pro Sekunde und ca. 960 Umdrehungen pro Minute; einschliesslich Riemenscheibe .		2100,—
1	Satz Gleitschienen mit Spannkloben ohne Holzschwellen		80,—
1	Nebenschluss - Regulierwiderstand auf Schieferplatte		125,—
1	Schalttafel aus Marmor mit allen erforderlichen Verbindungen und Anschlüssen, sowie mit:		
	1 Stromzeiger für Drehstrom, 100 Amp.,		
	1 » » Gleichstrom, 150 »		
		Summa	28805,—

Digitized by Google

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im einzelnen ℳ	Betrag im ganzen ℳ
	Übertrag		28 805,—
	1 Spannungszeiger für 110 Volt, 1 Reduktions-Transformator zum Spannungmessen für 110 Volt Sekundär- und 3000 Volt Primärspannung, 1 Arbeitszeiger für Drehstrom, 1 Vorschaltwiderstand für 3000 Volt Spannung, 1 dreipol. Hochspannungsschalter, 1 » Hochspannungssicherung für 75 Amp., bei 3000 Volt Spannung zusammen		1530,—
3	Hochspannungs-Blitzableiter mit Konsol für 3000 Volt Spannung	30,—	90,—
1	Erdplatte		15,—
15	*m* blanker Kupferdraht 25 *qmm* pro 1000 *m*	379,—	5,70
10	*m* verseiltes dreifaches Bleikabel für Drehstrom 3 zu 3000 Volt, 3 zu 35 *qmm* pro *m*	9,62	96,20
2	Endverschlüsse für 3 zu 35 *qmm* Kupferquerschnitt	33,25	66,50
3	Kabelschuhe für 35 *qmm* Kupferquerschnitt	—,30	—,90
20	*m* Kupferleitungen 70 *qmm*	1708,—	34,16
2	Kabelschuhe für 70 *qmm*	60,—	1,20
	Diverses Löt-, Isolier- und Befestigungsmaterial		145,34
	Motoren.		
5	Drehstrommotoren für 3000 Volt Spannung, von denen jeder bei einem Energieverbrauch von 41,5 Kilowatt 50 P. S. leistet, bei ca. 730 Umdrehungen pro Minute und einer Riemengeschwindigkeit von 16 *m* pro Sekunde; einschl. Riemenscheibe .	5000,—	25000,—
5	normale Anlasser mit eisernem Stufenschalter für Motoren	750,—	3750,—
5	Satz Gleitschienen mit Knarre, ohne Holzschwellen	195,—	975,—
	Summa		60 515,—

Digitized by Google

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im einzelnen ℳ	Betrag im ganzen ℳ
	Übertrag		60 515,—
5	dreipolige Hochspannungssicherungen für 15 Amp. bei 3000 Volt Spannung . .	44,—	220,—
5	dreipolige Hochspannungsausschalter mit Gehäuse für eine Spannung von 3000 Volt	160,—	800,—
100	*m* vulkanisierte Gummileitungen 6 *qmm*	429,—	42,90
30	Isolatoren	55,—	16,50
	Diverses Löt-, Isolier- und Befestigungsmaterial		155,60
	Verpackung		850,—
		Summa	62 600,—

Hier wurde angenommen, dass sowohl primär als auch an den Motoren 3000 Volt Spannung verwendet werden.

Etwas anders gestaltet sich der Kostenanschlag, wenn wir eine höhere, z. B. 4000 Volt Spannung primär wählen, und unter Anwendung von Transformatoren an den Motoren nur 500 Volt Spannung zulassen.

II. Fall.

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im ganzen ℳ
1	Drehstrom-Generator für 4000 Volt Spannung, welcher bei einem Kraftverbrauch von 323 P. S. und bei induktiver Belastung 227 Kilowatt leistet, 4300 Umdrehungen pro Minute und 24 *m* Riemengeschwindigkeit pro Sekunde; einschl. Riemenscheibe und drei Lager	26 500,—
1	Gleichstrommaschine zur Erregung für 110 Volt Spannung und einer Leitung bis zu 15 Kilowatt bei einem maximalen Kraftverbrauch von 23,5 P. S. für eine Riemengeschwindigkeit von 14 *m* pro Sekunde und ca. 960 Umdrehungen pro Minute; einschl. Riemenscheibe	2100,—
1	Satz Gleitschienen mit Spannkloben ohne Holzschwellen	80,—
1	Nebenschluss-Regulierwiderstand auf Schieferplatte .	125,—
1	Schalttafel aus Marmor mit allen erforderlichen Verbindungen und Anschlüssen, sowie mit folgenden Apparaten:	
	1 Stromanzeiger für Drehstrom,	
	1 » » Gleichstrom,	
	1 Spannungsanzeiger für 110 Volt für Gleichstrom,	
	Summa	28 805,—

Digitized by Google

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im ganzen ℳ
	Übertrag	28 805,—
	1 Reduktions-Transformator für Drehstrom zum Spannungsmessen für 110 Volt Sekundär- und 4000 Volt Primärspannung, 1 Arbeitszeiger für Drehstrom, 1 Vorschaltwiderstand für 4000 Volt, 1 dreipoliger Hochspannungsausschalter für 50 Amp., 4000 Volt, 1 dreipolige Hochspannungssicherung für 50 Amp., 4000 Volt, zusammen	1700,—
3	Hochspannungs-Blitzableiter	90,—
1	Erdplatte	15,—
15	*m* blanke Kupferleitungen	5,70
30	*m* vulkanisierte Kupferleitungen	39,30
30	Kabelschuhe für 25 *qmm* Kupferquerschnitt . . .	—,60
20	*m* Kupferleitungen 70 *qmm*	34,16
2	Kabelschuhe	1,20
	Diverses Isolier-, Löt- und Befestigungsmaterial . .	145,—

Sekundärstation.

3	Transformatoren für 75 Kilowatt bei Motorenbetrieb, für ein Übersetzungsverhältnis von 4000/500 Volt .	15750,—
1	Gehäuse mit 9 Hochspannungssicherungen für 4000 Volt und ca. 15 Amp.	330,—
1	Schalttafel aus Marmor mit folgenden Apparaten: 3 Sicherungen für 100 Amp., 500 Volt, 3 dreipolige Hebelausschalter für 100 Amp., 500 Volt, 3 dreipolige Hochspannungsausschalter für circa 15 Amp., 4000 Volt, zusammen	950,—
5	Drehstrommotoren für 500 Volt Spannung, von denen jeder bei einem Energieverbrauch von 45 Kilowatt 50 P. S. leistet bei ca. 730 Umdrehungen pro Minute und einer Riemengeschwindigkeit von 16 *m* pro Sekunde, einschl. Riemenscheibe	23250,—
5	normale Anlasser für Motoren	3750,—
5	Satz Gleitschienen mit Knarre ohne Holzschwellen .	975,—
15	Sicherungen für 70 Amp. und 500 Volt inkl. Schutzkappe	141,60
5	dreipolige Hebelausschalter für 100 Amp., 500 Volt .	400,—
	Summa	76 382,56

Digitized by Google

Stückzahl	Gegenstand	Betrag im ganzen ℳ
	Übertrag	76382,56
50	*m* vulkanisierte Gummileitung 6 *qmm*	21,45
100	» » » 35 »	171,50
50	» » » 50 »	116,50
9	Kabelschuhe für 50 *qmm*	4,05
15	» » 35 »	4,50
18	Isolatoren	9,90
	»	47,—
	Diverses Löt-, Isolier- und Befestigungsmaterial . .	142,54
	Verpackung	1700,—
		78600,—

(Ausserdem ist noch die Montage der Maschinen und die gesamte Leitung zu berechnen.)

Dieser zweite Fall erscheint demnach teuerer als der erste. Berechnet man aber dann die Leitungen, so wird sich zeigen, dass der zweite Fall bezüglich der Kosten günstiger wird, weil die Drahtquerschnitte in Folge der höheren Spannung und der geringeren Stromstärke bedeutend kleiner werden können.

Digitized by Google

Betriebskosten- und Rentabilitäts-Berechnung
für städtische Elektrizitätswerke.

36. Beispiel. Für die Rentabilitäts-Berechnung eines projektierten städtischen Elektricitätswerkes sind nachfolgende Summen der Energieentnahme in Rechnung gezogen worden:

a) Beleuchtung der Centrale.

2 Bogenlampen, 8 Amp. in Serie geschaltet . . .	1000	Watt
11 Glühlampen à 16 NK.	616	»
	1616	Watt

b) Strassenbeleuchtung.

70 Glühlampen, à 16 NK.	3920	Watt

c) Privat-Installationen.

300 Glühlampen, à 16 NK. (16 300 × 1200 =) . .	18000	Watt
Motore 12 P.S., à 1000 Watt.	12000	»
	30000	Watt

In Berechnung zu ziehende Watt-Stunden:

a) Die Beleuchtung der Centrale geschieht durchschnittlich Sommer und Winter täglich 3 Std. pro Jahr 1095 Std. (3 × 365).	1769520	W.-Std.
b) Da die Strassenbeleuchtung nicht immer die gleiche ist, so ist angenommen worden, dass eine Hälfte täglich 3 Std., pro Jahr = 1095 Std.	2146200	»
und die andere Hälfte täglich 4 Std., pro Jahr = 1460 Std.	2861600	»
funktioniert.		
c) Erfahrungsgemäss beziffert sich die Zahl der gleichzeitig brennenden Lampen bei Hausinstallationen auf ca. 50 % der gemeldeten. Diese brennen im Durchschnitt täglich 3 Std., pro Jahr 1095 Std.	9855000	»

Digitized by Google

Die Entnahme elektrischer Energie für Kraftzwecke beträgt 12 000 Watt, durchschnittlich 8 Std., pro Jahr = 2400 Std. (8 × 300) . . . 28 800 000 W.-Std.

Die Gesamtsumme der Watt-Stunden beträgt somit:

$$1\,769\,520 + 2\,146\,200 + 2\,861\,600 + 9\,855\,000 + 28\,800\,000 = 45\,432\,320 \text{ W.-Std.}$$

Von dieser Summe übernimmt die Akkumulatorenbatterie . . . . . 15 144 107 W.-Std.
und die Dynamomaschine den Rest, also . . . 30 288 213 »

Da der Nutzeffekt der Dynamomaschinen 95 %*), der Akkumulatorenbatterie 85 % ist und der Leitungsverlust 3 % beträgt, so ergiebt sich eine effektive, zur Berechnung zu ziehende Gesamtwattstundenzahl von:

$$\frac{15\,144\,107}{0{,}95 \times 0{,}85 \times 0{,}97} + \frac{30\,288\,213}{0{,}95 \times 0{,}97}$$

$$= 19\,333\,726 + 32\,868\,381 = 52\,202\,107 \text{ W.-Std.}$$

dazu 5 % Verlust in den Speiseleitungen . . . 2 610 106 »

54 812 213 W.-Std.

Demzufolge ist die Beanspruchung der Maschine mit 74 473 P. S.-Std. in Betracht zu ziehen.

Zur Erzeugung des für die Dampfmaschine nötigen, trockenen Dampfes gebraucht der vorgesehene Dampfkessel inkl. Anheizungsmaterial und sonstiger Verluste ca. 2,5 *kg* Kohlen pro P. S.-Std.

Der Kohlenverbrauch beträgt somit:

$$74\,473 \times 2{,}5 = 186\,183 \text{ kg Kohlen pro Jahr.}$$

Betriebskosten.

A. Indirekte.

Verzinsung des Anlagekapitals für Gebäude, Maschinen-Fundamente, Kesseleinmauerung, Brunnen und Schornstein ℳ 18 000,— zu 4 % . . . . . ℳ 720,—
Verzinsung des Anlagekapitals der elektrischen und maschinellen Einrichtungen ℳ 57 670,57 zu 4 % . » 2306,83

Summa 3026,83

*) Es wird zugestanden, dass dieser Nutzeffekt zu hoch angesetzt ist. 90 % würde besser entsprechen. Der besprochene Fall ist aber der Wirklichkeit entnommen, und hat ein »sogenannter« Sachverständiger, dessen Wissen durch Sachkenntnis nicht getrübt war, diese Ziffer verlangt. Den Nutzeffekt von 95 % zu kontrollieren, hat jener Sachverständige bei der Übernahme wohlweislich unterlassen.

Digitized by Google

	Übertrag ℳ	3026,83
Amortisation des aufgewendeten Kapitals inkl. desjenigen für Baulichkeiten: ℳ 75670,57 zu 1%	»	756,71
Amortisation für den Dampfkessel mit Speisevorrichtungen, für die Dampf- und Dynamomaschinen: ℳ 24163,49 zu 10%	»	2416,35
Amortisation für die Akkumulatorenbatterie ℳ 12269,— zu 10%	»	1226,90
Amortisation für die Schalttafel, das Leitungsnetz, die Strassenbeleuchtung, für die Masten, sowie für die Beleuchtung und die Verbindungen in der Centrale: ℳ 16892,— zu 5% ca.	»	844,60

Betriebspersonalkosten.

Ein Maschinist an Gehalt jährlich	»	1200,—
Ein Hilfsmaschinist bez. Heizer	»	1000,—

B. Direkte Betriebskosten.

Jährlicher Kohlenverbrauch 186183 *kg*, pro 100 *kg* ℳ 1,20	»	2234,20
Für kleine fortlaufende Reparaturen	»	200,—
Für Öl, Schmier- und Putzmaterial	»	250,—
Ersatz für Glühlampen, pro Lampe ca. 900 Brennstunden; mithin ca. 106 Lampen pro Jahr ℳ —,60	»	63,60
Ersatz von Kohlenstiften für die Bogenlampen; 2190 Brennstunden pro Jahr und pro 10 Std. 1 Satz Kohlenstifte à ℳ 1,20	»	26,28
Für unvorhergesehene Fälle und zur Abrundung . .	»	54,53
Gesamtbetriebskosten	ℳ	13300,—

d. h. ℳ 13300,— muss man ausgeben, um 54812213 Wattstunden zu leisten. Die Hektowattstunde kostet somit 2,43 ₰. Je höher der Konsum, desto billiger wird die Energie!

Rentabilitätsnachweis.

Der Preis des stündlichen Stromkonsums wird pro Hektowatt für Licht 6 und für Kraft 2,5 ₰ festgesetzt.

Bei Anwendung dieses Tarifs beträgt die jährliche Einnahme für Licht bei der Annahme, dass 50% der Anmeldungen täglich 3 Std. lang Strom entnehmen, 98550 Hektowatt	ℳ	5913,—
für Kraft, bei 288000 Hektowatt	»	7200,—
und für die Stadtbeleuchtung 50078 Hektowatt . .	»	2704,—
	ℳ	15817,—

Digitized by Google

Dieser Einnahme von . . . . . ℳ 15817,—
steht eine Betriebsausgabe von . . . . » 13300,—
gegenüber.
Somit beträgt der Reingewinn pro Jahr . . . . . ℳ 2517,00
Dabei erfolgt die gesamte Beleuchtung der Centrale kostenlos.

37. Beispiel. Wir wollen noch einen zweiten derartigen Fall berechnen:

a) Beleuchtung der Centrale.

4 Bogenlampen	1200 Watt
12 Glühlampen à 25 NK.	1044 »
	2244 Watt

b) Strassenbeleuchtung.

19 Bogenlampen	7200 Watt
33 Glühlampen à 25 NK.	2871 »
	10071 Watt

c) Hausinstallationen.

Beleuchtungen	47181 Watt
Kraft	5400 »
	52581 Watt

In Berechnung zu ziehende Watt-Stunden:

a)	Die Beleuchtung der Centrale geschieht durchschnittlich Sommer und Winter täglich 3 Std., d. s. pro Jahr 1095 Std.	2457180 W.-Std.
b)	Da die Strassenbeleuchtung nicht immer die gleiche ist (es sollen die gesamten Strassen bis 11 Uhr und ein Teil derselben noch länger beleuchtet werden), so ist angenommen, dass eine Hälfte täglich 3 Std., pro Jahr 1095 Std.	5513325 »
	und die andere Hälfte täglich 4 Std., pro Jahr 1460 Std. funktioniert	7352560 »
c)	Wir wollen in diesem Falle annehmen, dass sich die Zahl der gleichzeitig leuchtenden Lampen bei Hausinstallationen auf ca. 70% der gemeldeten beziffert. Diese brennen im Durchschnitt täglich 3 Std., d. s. pro Jahr 1095 Std.	36164565 »
	Summa	51487630 W.-Std.

Digitized by Google

	Übertrag	51487630 W.-Std.
Die Entnahme elektrischer Energie für Kraftzwecke beträgt nach der Konsumentenliste 6570 Watt, durchschnittlich 2 Std., pro Tag; d. s. pro Jahr 600 Std.	3942000	»
Die Gesamtsumme der Watt-Stunden beträgt somit	55429630	W.-Std.
Von dieser Summe übernimmt die Akkumulatorenbatterie	18476543	»
und die Dynamomaschine	36953087	»

Da der Nutzeffekt der Dynamomaschinen mit 90 % und der Akkumulatorenbatterie mit 85 % anzusetzen ist, und der Leitungsverlust 3 % beträgt, so ergiebt sich eine effektive, zur Berechnung zu ziehende Gesamtwattstundenzahl von:

$$\text{Akk.}\ \frac{18476543}{0{,}90 \times 0{,}85 \times 0{,}97} + \text{Dyn.}\ \frac{36953087}{0{,}90 \times 0{,}97}$$

$$= 25000000 + 42500000 = 67500000 \text{ W.-Std.}$$

10 % Verlust in der Speiseleitung . . . . . 25000000 »

Demzufolge ist eine Beanspruchung der Maschine $\frac{70000000}{736}$ = rund 95200 P. S.-Stunden in Betracht zu ziehen.

Zur Erzeugung des für die Dampfmaschine benötigten trockenen Dampfes gebraucht der vorgesehene Dampfkessel inkl. Anheizungsmaterial und sonstiger Verluste ca. 3 *kg* Kohlen pro P. S.-Stunde.

Der Kohlenverbrauch beträgt somit:

$$95200 \times 3 = 285600 \text{ } kg \text{ pro Jahr.}$$

Betriebskosten.

A. Indirekte.

Verzinsung des Anlagekapitals für Gebäude, Maschinen-Fundamente, Kesseleinmauerung, Brunnen und Schornstein ℳ 24697,91 zu 4 %	ℳ	987,92
Verzinsung des Anlagekapitals für die elektrischen und maschinellen Einrichtungen ℳ 101355,73 zu 4 %	»	4054,23
Allgemeine Amortisation des gesamten Kapitals inkl. desjenigen für die Baulichkeiten: ℳ 126053,64 zu 1 %	»	1260,54
Amortisation für den Dampfkessel samt Speisevorrichtungen; für die Dampf- und Dynamomaschinen: ℳ 28577,67 zu 10 %	»	2856,76
Amortisation der Akkumulatorenbatterie ℳ 27820,50 zu 10 %	»	2782,05
Amortisation für die Schalttafel, das Leitungsnetz, die Strassenbeleuchtung, die Masten, sowie für die Beleuchtung und die Verbindungen in der Centrale ℳ 36167,61 zu 5 %	»	1808,38
Summa	ℳ	13749,88

Digitized by Google

Betriebspersonal.

	Übertrag:	ℳ 13749,88
1 Maschinist an Gehalt jährlich	»	1200,—
1 Hilfsmaschinist bez. Heizer	»	1000,—

B. Direkte Betriebskosten.

Jährlicher Kohlenverbrauch 285600 *kg*, pro 100 *kg* ℳ 1,30	»	3712,—
Für kleine Reparaturen	»	150,—
Für Öl, Schmier- und Putzmaterial	»	250,—
Ersatz für Glühlampen; pro Lampe ca. 900 Brennstunden; mithin ca. 60 Lampen pro Jahr, à ℳ 0,60	»	36,—
Ersatz von Kohlenstiften für die Bogenlampen; 28470 Brennstunden pro Jahr und pro 10 Std. 1 Satz Kohlenstifte à 120 ₰	»	341,64
Für Unvorhergesehenes und Abrundung	»	60,48
Gesamtbetriebskosten	ℳ	20500,—

Hierfür müssen 55429630 Watt-Stunden geliefert werden.

Der Preis der Hektowattstunde stellt sich demnach aus vorstehender Berechnung auf 3,69 ₰.

Rentabilitätsnachweis.

Der Preis des stündlichen Stromkonsums soll pro Hektowatt für Licht 6,25 ₰ und für Kraft 1,7 ₰ nicht überschreiten.

Bei Anwendung dieses Tarifs beträgt die jährliche Einnahme für Licht bei Annahme, dass (wie angegeben) 70% der Anmeldungen täglich 3 Std. lang Strom entnehmen (361645 Hektowatt)	»	22602,81
und für Kraft bei 39420 Hektowatt	»	670,14
	ℳ	23272,95
Dieser Einnahme von	ℳ	23272,95
steht eine Betriebsausgabe von	»	20500,—
gegenüber.		
Somit beträgt der Reingewinn pro Jahr	»	2772,95

Ausser diesem Reingewinn erhält die Stadt die gesamte Beleuchtung der Strassen und der Centrale kostenlos.

(Anmerkung.

Kosten der Strassenbeleuchtung.

128659 Hektowattstunden . . . . . 128659 × 3,69 = 4747,52 ℳ

Kosten der Beleuchtung der Centrale.

24572 Hektowattstunden . . . . . 24572 × 3,69 = 906,70 ℳ).

Digitized by Google

Tabelle.

Drehstrom-Motoren der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft, Berlin.

Grösse	Leistung in P. S. ca.	Spannung zwischen zwei Leitungen	Stromstärke in jeder Leitung, Amp. ca.	Gesamt-Watt-verbrauch ca.	cos φ ca.	Umdrehung pro Minute bei 100 Wechsel pro Sekunde ca.
DR 1	1/16	110 190	1,3 1	115	0,5	2700
DR 3	1/4	110 190	2,5 1,5	300	0,6	1425
DR 5	1/2	110 190	4,3 2,5	530	0,7	1425
DR 10	1	110 190	8 4,6	1000	0,7	1425
DR 20	2	110 190	14 8	1880	0,7	1425
DR 30	3	110 190	20 11,5	2760	0,75	1425
DR 30 mod.	2	110 190	14 8	1880	0,75	950
DR 50	5	110 190	30 18	4430	0,75	1425
DR 50 mod.	3,5	110 190	23,5 13,5	3200	0,75	950
DR 80	8	110 190	47 27	7000	0,8	1425
DR 80 mod.	6	110 190	37 21,5	5400	0,8	950
DR 100	10	110 190	56 33	8650	0,8	950
DR 150	15	110 190	84 48	12800	0,8	950
DR 200	20	110 190	120 70	17150	0,8	475
DR 200 mod.	30	190 500	115 43	26000	0,7	570
ND 400	40	190 500 2000	115 43 11	33000	0,88	720
ND 500	50	190 500 2000	140 53 13	41000	0,88	570
ND 750	75	190 500 2000	200 80 20	61000	0,88	570
ND 10000	100	190 500 2000	270 105 26	81500	0,88	480

Digitized by Google

Tabelle.

Drehstrom-Motoren der A.-G Siemens & Halske, Berlin.

Effektive Leistung der Motoren	Periodenzahl	Touren pro Minute bei Leerlauf	Touren pro Minute bei Vollbelastung	Durchmesser der Riemenscheibe	Maximale Zugkraft beim Angehen	Zugkraft beim Angehen äquivalent der Vollbelastung	Schenkelspannung	Stromstärke pro Kreis bei Leerlauf	Stromstärke pro Kreis bei Normalbelastung (Kol. 13)	Energieverbrauch bei Leerlauf	Energieverbrauch bei Normalbelastung (Kol. 13)	Normalleistung während der Dauerprobe von 4 Stunden	Normalleistung während der Dauerprobe von 4 Stunden	Kommerzieller Wirkungsgrad bei Normalbelastung (Kol. 13)	Gewicht des kompletten Motors.
P. S.				*mm*	*kg*	*kg*	Volt	Amp.	Amp.	Watt	Watt	P. S.	Watt	%	*kg*
1/4	50	1450	1320	78	8	3,5	60,5	1,3	2,5	105	325	0,23	170	52	42
1/2	50	1450	1335	88	9	6,1	60	4	8	—	670	0,49	368	55	60
1 1/2	50	1450	1350	104	19	15,3	57	7	13,8	346	1900	1,5	1104	60	100
3	50	1475	1380	190	17	16,5	63	7,5	18	404	2940	3	2208	75	150
6	50	975	910	240	80	37,5	61	20	59	—	6620	7,1	5300	80	275
9	50	970	900	240	95	60	67	25	86	—	10400	11,5	8600	83	420

Die Preise für Wechselstrom-Maschinen schwanken noch immer derart, dass deren Angabe hier unterlassen werden musste. (Siehe übrigens die Bemerkungen zur Tabelle Seite 101.)

Tabelle.

Wechselstrom-Dynamos für Ein- und Mehrphasen- (Dreh-) Strom der Firma Akt.-Gesellsch. Elektr.-Werke (vorm. O. L. Kummer & Co.).

Type	Modell	Maximale Dauerleistung bei Einphasenstrom	Maximale Dauerleistung bei Mehrphasenstrom	Kraftverbrauch ausschliesslich Erregung bei Einphasenstrom	Kraftverbrauch ausschliesslich Erregung bei Mehrphasenstrom	Umlaufzahl pro Minute	Werte von $G \times v^2 \times 10^3$	Spannung höchste	Spannung niederste	Watt pro eff. P. S.	η ohne Erregung in %	Erregerstrom in %	Erreger-Dynamo für Riemenbetrieb (Type Lambda)	Erreger-Dynamo für direkte Kuppelung (Type Zeta)
		in Kilowatt		in eff. P. S.				in Volt			ca.	ca.	Modell	Modell
Delta	JJ_1	60	72	80	107	375	455	5000	72	690	0,94	2,5	A_2	C
	JJ_2	76	90	112	133	375	600	5000	72	690	0,94	2,5	A_1	C
	KK_1	90	108	132	148	300	870	5000	72	695	0,945	2	A_1	D
	KK_2	105	125	144	173	300	1060	5000	72	695	0,945	2	A_1	D
	KK_3	135	160	200	235	300	1300	5000	72	695	0,945	2	B	D
	LL_1	170	200	250	200	250	1700	5000	72	700	0,95	1,7	B	E
	LL_2	230	275	335	400	250	2360	5000	72	700	0,95	1,7	C_1	E
	LL_3	260	310	380	450	250	2660	5000	72	700	0,95	1,7	C_2	E
	MM_1	320	380	460	550	215	3370	5000	72	705	0,96	1,5	C_3	F
	MM_2	400	480	575	690	215	4200	5000	72	705	0,96	1,5	D	F

Anmerkung. Diese Maschinen haben feststehenden Anker, mittlere Umlaufzahl und 100 Polwechsel in der Sekunde. Es ist empfehlenswert, ein oder zwei Ankersegmente in Reserve zu halten, da bei Spannungen von 2000 bis 5000 Volt ein Durchschlagen der Spulen nicht ausgeschlossen ist.

Die angegebenen Werte über den Wirkungsgrad werden in der Regel erreicht, aber nur dann garantiert, wenn eine Toleranz von 2% zugestanden wird.

Digitized by Google

Tabelle.

Wechselstrom-Motoren für einfachen Wechselstrom und für Drehstrom der Firma Akt.-Gesellsch. Elektr.-Werke (vorm. O. L. Kummer & Co.).

Type	Modell	Dauerleistung bei 100 bis 500 Volt als Einphasen-Motor in P. S.	Dauerleistung bei 100 bis 500 Volt als Zwei- und Dreiphasen-Motor in P. S.	Dauerleistung als Zwei- oder Dreiphasen-(Drehstrom-) Motor in P. S.	Umlaufzahl pro Minute	Wattverbrauch pro eff. P. S.	η der Zwei- und Dreiphasen-Motoren	Leistungsfaktor
Alpha (ohne Schleifringe)	MA	0,25	0,33	—	1450	1300	0,56	0,66
	MB	0,5	0,65	—	1450	1120	0,65	0,74
	ME	1,0	1,3	—	1450	1050	0,70	0,78
	MD	2,5	3,3	—	1450	960	0,76	0,82
Alpha (mit Schleifringen)	ME_1	5	6,5	—	1450	920	0,80	0,80
	ME_2	7	10	—	1450	870	0,83	0,82
	MF	9,5	13	10 bis 15 bei 500 bis 1000 Volt	1450	850	0,86	0,84
	MG	14	20		970	830	0,88	0,85
	MH	18,5	27	20 bis 25 bei 500 bis 2000 Volt	970	820	0,89	0,86
	MJ	23	33		725	815	0,90	0,87
	MK	28	40	30 bis 40 bei 500 bis 3000 Volt	725	810	0,91	0,88
	ML	36	55		485	800	0,92	0,89
	MM	51	80	60	485	790	0,93	0,90
	MN	68	105	80 bis 110 bei 500 bis 5000 Volt	485	790	0,93	0,91
	MO	95	145		420	785	0,94	0,92
	MP	130	200	150	420	785	0,94	0,93

Anmerkung. Diese Motoren arbeiten bei 100 Polwechsel in der Sekunde. Wenn es verlangt wird, werden diese Motoren auch so gebaut, dass sie bei stark wechselnder Belastung 2 bis 2,5fache Anzugskraft haben und auch bedeutende Überlastung aushalten; natürlich kann das aber nur auf Kosten des Wirkungsgrades und des Leistungsfaktors geschehen.

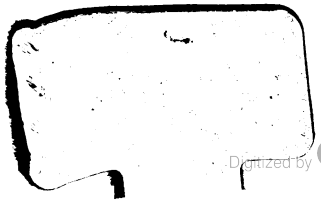
1. Die Einphasen-Motoren von MA bis MC werden ohne Schleifringe gebaut und laufen bei einer Anlassvorrichtung, enthaltend einen Phasenwiderstand, mit $^1/_3$ der normalen Belastung an. Die Einphasen-Motoren von MD bis zu den grössten werden mit Schleifringen gebaut und laufen bei einer Anlassvorrichtung, enthaltend Kapazität und Induktionsspule, bis zu $^3/_4$ der vollen Last an. Motor MD wird jedoch auf Wunsch auch ohne Schleifringe gebaut. Die Zwei- und Dreiphasen-Motoren laufen mit voller Last an, und zwar diejenigen mit Schleifringen bei normaler Stromstärke, während die ohne Schleifringe beim Angehen einen grösseren Strom verbrauchen. Von ME_1 an werden deshalb auch die Mehrphasen-Motoren wegen der geringen Anlaufstromstärke vorteilhaft nur mit Schleifringen verwendet. 2. Die kleinen Mehrphasen-Motoren MA bis MC können direkt von der Lichtleitung gespeist werden; für die grösseren Modelle empfiehlt es sich, besondere Transformatoren aufzustellen. Für Zweiphasen-Motoren sind Zweiphasen-Transformatoren und für Dreiphasen-Motoren sind Dreiphasen-Transformatoren aufzustellen, falls nicht ein besonderes Leitungsnetz für Motorstrom zur Verfügung steht.

Druck von Oskar Leiner in Leipzig. 46965

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google



Digitized by Google

Eng 1779.00.3
Wirkungsgrade und kosten elektrisch
Cabot Science 005858820
3 2044 091 987 396

Digitized by Google